

Vliv průběhu řídicího proudu na optické parametry laserové diody

Influence of drive current on optical characteristics of laser diode

Bc. Miroslav Slouka

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem tvaru řídicího proudu na optické parametry laserové diody. Porovnáván je zde kontinuální režim řízení s pulzně-šířkovou modulací u zelené a modré laserové diody spolu s vlivem zvýšené provozní teploty. Úvodní část textu přináší stručný úvod do teorie laserů a laserových diod, dále seznamuje s vytipovanými diodami a realizací jejich řízení. Následují dvě experimentální měření, která jsou uvedena teoretickým popisem dané problematiky. První experiment se zaměřuje na fotometrické a spektrální parametry za použití sestavy se spektrometrem a kulovým integrátorem. U druhého experimentu je měřena prostorová svítivost goniofotometrem. Závěr práce obsahuje souhrn naměřených hodnot a určení vlivů řízení na sledované parametry.

Klíčová slova

CW, fotometrie, laser, laserová dioda, spektrometrie, PWM, vliv řízení

Abstract

The Diploma thesis deals with the influence of drive current on optical characteristics of laser diode. The continuous control mode of green and blue laser diode is compared with pulse-width modulation, together with the influence of the increased operating temperature. The initial part of the thesis gives a brief introduction to the theory of lasers and laser diodes, followed by presentation of selected diodes and realization of their drive. The following are two experimental measurements, which are always given a theoretical description of the problematics. The first experiment focuses on photometric and spectral parameters, using an assembly with a spectrometer and an integrating sphere. In the second experiment, the spatial luminosity is measured with a goniophotometer. The conclusion of the thesis contains a summary of measured values and determination of the effects of control on the monitored parameters.

Keywords

CW, drive influence, laser, laser diode, photometry, PWM, spektrometry

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Petru Palackému a Dr. Janu Látalovi z Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO, dále pak Dr. Pavlu Pavlíčkovi z Fyzikálního ústavu AV ČR a Dr. Ladislavu Stankemu z Human-Light Interaction Laboratory FF UPOL za ochotu, cenné rady a připomínky.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	6
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 LASER	13
2.1 Historie a současnost	13
2.2 Princip generace laserového záření	15
2.3 Rezonátorová optika	17
2.4 Klasifikace	19
2.5 Bezpečnostní rizika laserového záření	20
2.6 Charakteristiky laserových diod	21
2.7 Typy laserových diod	22
3 Příprava experimentů	25
3.1 Vybrané laserové diody	25
3.2 Proudové řízení použitých LD	26
3.3 Experimenty	27
4 Experiment I. - světelný tok a spektrum	28
4.1 Světelné spektrum a měřené veličiny	28
4.2 Použité měřicí zařízení	30
4.3 Měření fotometrických a spektrálních parametrů	32
4.4 Souhrn měření fotometrických a spektrálních parametrů	37
5 Experiment II. - prostorová svítivost	39
5.1 Použité měřicí zařízení	39
5.2 Měření prostorové svítivosti	42

5.3	Souhrn měření prostorové svítivosti.	51
6	Závěr	53
	Literatura	55
	Přílohy	59

Seznam použitých zkratk a symbolů

CCD	– Charge Coupled Device, zařízení s nábojově vázanými prvky
CD	– Compact disc, kompaktní disk
CIE	– Commission internationale de l'éclairage, Mezinárodní komise pro osvětlování
CO ₂	– oxid uhličitý
CW	– Continuos wave, spojitá (kontinuální) vlna - používáno v souvislosti s lasery, které emitují světlo v kontinuálním režimu.
ČR	– Česká republika
ČSN	– Česká technická norma
DHL	– Double Heterostructure Laser, laser s dvojitou heterostrukturou
DBFL	– Distributed Feed Back Laser, laser s rozloženou zpětnou vazbou
EEL	– Edge Emitting Laser, hranově vyzařující lasery
EN	– Evropská norma
FG	– funkční generátor
FP	– Fabryův-Perotův - používáno v souvislosti s rezonátorem
FWHM	– Full Width at Half Maximum, plná šířka v polovině maxima
GaAs	– Galium Arsen
GaN	– Galium Nitrid
H	– horizontální úhel
HL	– Heterostructure Laser, heterostrukturní laser
HoL	– Homostructure Laser, homostrukturní laser
IR	– Infrared, infračervená
InGaN	– Indium Gallium Nitride
LASER	– Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla stimulovanou emisí záření
LD	– laserová dioda
LED	– Light Emitting Diode, dioda emitující světlo

MASER	– Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření
Nd:YAG	– Neodym Yttrium Aluminium Granát
NIR	– Near Infrared, blízka infračervená
NUV	– Near Ultraviolet, blízka ultrafialová
PD	– Photo Diode, fotodioda
PTFE	– polytetrafluorethylen
SHL	– Single Heterostructure Laser, laser s jednou heterostrukturou
PWM	– Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
QWL	– Quantum Wells Laser, laser s kvantovými jámami
TEC	– Thermoelectric Cooler, termoelektrický chladič
TEM	– Transverse Electromagnetic Mode, příčný elektromagnetický režim
UV	– Ultraviolet, ultrafialová
V	– vertikální úhel
VCSEL	– Vertical Cavity Surface Emitting Laser, plošně vyzařující laser
c	– rychlost světla
C_x a C_y	– souřadnice trichromatického diagramu
C_E	– střed trichromatického diagramu
d	– průměr
E	– energie
E_v	– osvětlenost
f	– frekvence
h	– Planckova konstanta
I	– proud
I_F	– proud v propustném směru
I_P	– prahový proud
I_s	– svítivost
i	– index naměřené hodnoty
k	– součinitel rozdělení nejistoty
L	– zdroj záření
m	– počet uzlů stojatého vlnění v horizontální ose
n	– soubor naměřených hodnot
Q_e	– zářivá energie
q	– počet půlvln
R	– poloměr
S	– plocha
s	– počet uzlů stojatého vlnění ve vertikální ose
t	– čas

U_r	– řídicí napětí
u_a	– standardní nejistota typu A
u_b	– standardní nejistota typu B
u_c	– kombinovaná nejistota
$V(\lambda)$	– spektrální citlivost lidského oka
v_f	– frekvenční interval
ϑ	– teplota
λ	– vlnová délka
λ_D	– dominantní vlnová délka
λ_q	– vlnová délka středu frekvenčního intervalu
Σ	– suma
ϕ	– světelný tok
ϕ_e	– zářivý tok
Ω	– prostorový úhel

Seznam obrázků

2.1	Přehled používaných laserů, jejich vlnových délek a typicky dosahovaný výkonů [21].	14
2.2	Ilustrace záření [22].	15
2.3	Emise záření [23].	15
2.4	Stimulovaná emise v rezonátoru [25].	16
2.5	Zleva planární, sférický, kruhový a vláknový rezonátor [26].	17
2.6	Podmínka pro λ v rezonátoru [26].	17
2.7	Rezonátor se sférickými vyduťnými zrcadly [26].	18
2.8	Gaussovský svazek [26].	18
2.9	Hermite-gaussovské svazky [27].	19
2.10	Ohrožení zraku laserovým zářením [23].	20
2.11	Závislost optického výkonu na proudu LD pro různé teploty [31].	21
2.12	Porovnání charakteristik LD a LED [30, 31].	21
2.13	Homostrukturní čip [33].	22
2.14	Heterostrukturní čip [33].	22
2.15	Lasery s rozloženou zpětnou vazbou [33].	23
2.16	Struktura AlGaAs kvantové jámy [34].	23
2.17	Příčný řez svazku [35].	24
2.18	Pouzdrvení laserové diody [36].	24
3.1	Struktura LD PLT5 520B pod mikroskopem.	25
3.2	Realizace proudového řízení.	26
3.3	Časový průběh světelného výstupu LD.	26
3.4	Termogram neemitující LD PLT5 450B při $\vartheta = 50 \pm 0,1$ °C.	27
4.1	Spektrum Nd:YAG a CO ₂ laseru, wolframové žárovky a xenonové výbojky [42]. . . .	28
4.2	Parametry charakterizující světelné spektrum [39].	29
4.3	Schématické řezy použitých komponent [43, 45].	30
4.4	Foto zařízení [43, 44].	30
4.5	Sestava pro měření světelného toku.	31

4.6	Závislost světelného toku na střední hodnotě proudu LD PLT5 520B	32
4.7	Okolí prahů LD PLT5 520B	32
4.8	Závislost dominantní vlnové délky na střední hodnotě proudu LD PLT5 520B . . .	33
4.9	Závislost FWHM na střední hodnotě proudu LD PLT5 520B	33
4.10	Závislost světelného toku na střední hodnotě proudu LD PLT5 450B	34
4.11	Okolí prahů LD PLT5 450B	34
4.12	Závislost dominantní vlnové délky na střední hodnotě proudu LD PLT5 450B . . .	35
4.13	Závislost FWHM na střední hodnotě proudu LD PLT5 450B	35
4.14	Spektrální křivky LD PLT5 520B při $\phi \approx 112$ mlm.	36
4.15	Spektrální křivky LD PLT5 450B při $\phi \approx 7$ mlm.	36
5.1	Měřicí zařízení [46].	39
5.2	Křivky $V(\lambda)$ [50].	40
5.3	Fotometr LMT S 1600 [51].	41
5.4	Příčné profily v blízkosti prahu.	42
5.5	Příčné profily při I_{max}	42
5.6	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 520B - CW režim.	43
5.7	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 520B - PWM režim.	43
5.8	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 520B , $I_{s(250mA, \theta=50^\circ C)} - I_{s(250mA)}$	43
5.9	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD PLT5 520B - CW režim.	44
5.10	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD PLT5 520B - PWM režim.	44
5.11	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD PLT5 520B - CW režim.	45
5.12	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD PLT5 520B - PWM režim.	45
5.13	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu -4° LD PLT5 520B - CW režim.	46
5.14	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu -4° LD PLT5 520B - PWM režim.	46
5.15	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 450B - CW režim.	47
5.16	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 450B - PWM režim.	47
5.17	Rozdíly příčných profilů LD PLT5 450B , $I_{s(150mA, \theta=50^\circ C)} - I_{s(150mA)}$	47
5.18	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD PLT5 450B - CW režim.	48
5.19	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD PLT5 450B - PWM režim.	48
5.20	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD PLT5 450B - CW režim.	49
5.21	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD PLT5 450B - PWM režim.	49
5.22	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu -4° LD PLT5 450B - CW režim.	50
5.23	Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu -4° LD PLT5 450B - PWM režim.	50
5.24	Ilustrace oblasti nejvýznamnějších změn při CW režimu řízení.	51

Seznam tabulek

2.1	Základní klasifikace laserů [23].	19
3.1	Základní parametry LD [Příloha č. 1 - 2].	25
5.1	Limity měřiče osvětlení ve třídě L [52].	41

Kapitola 1

Úvod

Laserové diody jsou elektronické světelné zdroje jedinečných vlastností, nacházející stále pestřejší využití v několika různorodých odvětvích. Díky nárůstu integrace těchto polovodičových zdrojů se s nimi v běžném životě setkal takřka každý. Za zmínku stojí např. aplikace ovládání kurzoru myši, skenery pokladen, světelné projekce, nebo laserové ukazovátko. Parametry těchto zdrojů však do značné míry ovlivňuje způsob jejich provozu, potažmo řízení.

Tato práce se zaměřuje na vliv tvaru řídicího proudu na optické parametry u dvou komerčně dostupných laserových diod firmy OSRAM. Jedná se o lasery emitující viditelné světelné záření v zelené a modré spektrální oblasti. U těchto diod jsou porovnávány dva typy řízení. Tím prvním je tzv. kontinuální řízení (CW), kdy je hodnota procházejícího proudu časově spojitá a neměnná, střední hodnota proudu se tedy rovná okamžité hodnotě. Druhým typem je pak řízení pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), kdy diodou procházejí proudové pulzy o určité okamžité hodnotě, jejich střídou lze měnit střední hodnotu. Také je zkoumán vliv zvýšené provozní teploty.

Text práce je strukturován do pěti kapitol. Úvodní část textu přináší stručný úvod do teorie laserů. Popsána je zde historie, princip generace laserového záření, konstrukční uspořádání, základní klasifikace a bezpečnostní rizika těchto světelných zdrojů. Následuje charakterizace a popis jednotlivých typů laserových diod. Po této teoretické kapitole přichází část popisující přípravu experimentů. Představeny jsou zde vytipované laserové diody a realizace řízení s popisem použitých zařízení. Kapitola také seznamuje s jednotlivými experimenty a obecným určením nejistot.

Následují tři kapitoly zabývající se jednotlivými experimenty, uvedené teoretickým popisem dané problematiky s určením nejistoty měřicího zařízení. Jako první jsou měřeny fotometrické a spektrální parametry, tedy světelný tok, dominantní vlnová délka a šířka spektra v polovině maximální hodnoty (FWHM). Emitované světlo je shromážděno kulovým integrátorem a pomocí optického kabelu přivedeno do spektrometru. Druhý experiment se zabývá prostorovým rozložením svítivosti, kdy jsou měřeny příčné profily svazků pomocí goniofotometru.

Cílem této práce je zjistit, jaký vliv má tvar průběhu řídicího proudu na vybrané parametry laserových diod.

Kapitola 2

LASER

Tato kapitola obsahuje stručný úvod do teorie laserů a laserových diod. Začátek kapitoly popisuje historický vývoj, následuje seznámení s principem generace laserového záření, základní klasifikace a dělení bezpečnostních tříd. Druhá polovina kapitoly se zabývá laserovými diodami, jsou zde uvedeny základní typy laserových diod a jejich charakteristiky.

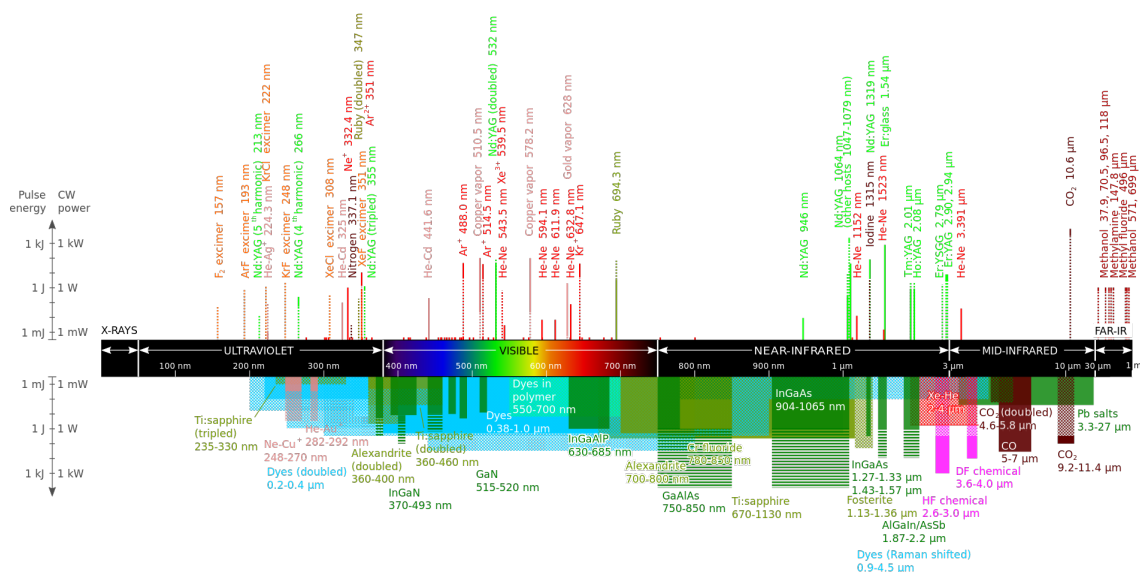
2.1 Historie a současnost

V roce 1900 německý fyzik Max Planck rozvinul myšlenku, že je světlo tvořeno kvanty energie [1]. Na tuto teorii navázal Albert Einstein v roce 1917, který objevil stimulovanou emisi a té bylo později využito při konstrukci laseru [2]. Patent pro laser získali v roce 1960 Charles Townes a Arthur Schawlow, kteří přišli s teorií zesilování mikrovln a laserových záření [3], se stejným objevem přišli také sovětsí vědci Alexandr Michajlovič Prochorov a Nikolaj Genadijevič Basov. Townes, Basov i Prochorov dostali za vynález laseru v roce 1964 Nobelovu cenu za fyziku. Schawlow byl Nobelovým úřadem oceněn až v roce 1981 [4]. Vůbec první fungující LASER však sestrojil Theodor Maiman v roce 1960 [5] (rubínový laser $\lambda = 694 \text{ nm}$) a již rok poté se začínají objevovat první aplikace laseru v očním lékařství [6].

První laser byl v tehdejší Československu sestaven Karlem Pátkem v roce 1963 na půdě Fyzikálního ústavu Československé akademie věd [7]. Jednalo se o technologii laseru s aktivním prostředím z neodymového skla, kterou jako první využil E. Snitzer v roce 1961 [8]. V průběhu 60. a 70. let došlo k útlumu vývoje laserových technologií v Československu, rozmach přišel až v 80. letech, kdy byl zprovozněn jódový laser PERUN s výkonem 100 GW (nejprve 300 mJ ve 20 ns, poté 9,9 J v 1,5 ns). Následoval vylepšený systém PERUN II v roce 1992 (50 J, 300 ps.) V roce 1998 vzniká v Praze pod záštitou Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky centrum PALS s pulzním terawatovým jódovým laserem ASTERIX IV. O jedenáct let později vzniká projekt ELI Beamlines, zaměřený na primární výzkum pevnolátkových laserů a v roce 2014 centrum HiLASE zaměřené na průmyslové aplikace [9].

První lasery byly homostrukturní, tzn. PN přechod byl tvořen jedním typem sloučeniny. Tato konstrukce umožňovala provoz pouze v pulzním režimu, kvůli vysoké hustotě prahového proudu. Po vynálezu kapalně epitaxní bylo možné vytvářet heterostrukturní přechody, které umožnily provoz diod v režimu kontinuálním, avšak při dostatečném chlazení. Tato technologie byla později nahrazena plynou epitaxí z organokovových sloučenin a epitaxním růstem z molekulárních svazků [14, 15]. Takto se podařilo snížit hustotu prahového proudu až na 1/10 původní hodnoty. Provoz v kontinuálním režimu při pokojové teplotě bylo možné dosáhnout až při konstrukci dvojitého heteropřechodu, kterou poprvé použili sovětsí vědci Žores Alfjorov a Dmitrij Garbuzov [16] a zároveň američtí vědci Morton Panish s Izuem Hayashim v roce 1970 [17]. Za vynález heterogenního tranzistoru pak v roce 2000 získal Žorés Alfjorov Nobelovu cenu za fyziku [4].

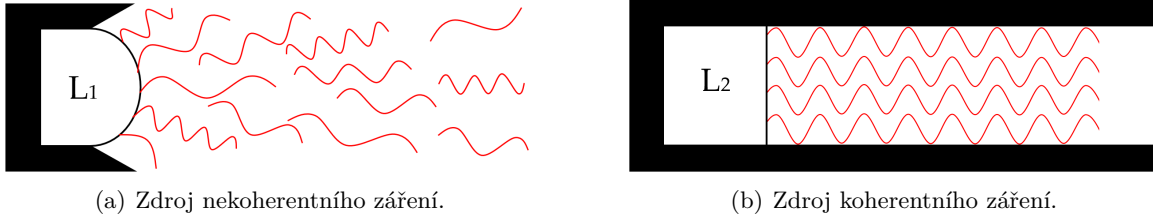
Lasery za poměrně krátkou dobu prošly bouřlivým vývojem a začaly se hojně využívat v mnoha oborech jako je např. komerční elektronika (CD, tisk), lékařství (dermatologie, chirurgie), průmysl (svařování, gravírování), meteorologie (laserový radar), vojenské aplikace (navádění raket, zaměřovače), aj. [18]. Nově také našly uplatnění v meziplanetární komunikaci [19], nebo v automobilovém osvětlení [20]. Obr. 2.1 zobrazuje parametry komerčně používaných laserů [21].



Obrázek 2.1: Přehled používaných laserů, jejich vlnových délek a typicky dosahovaný výkonů [21].

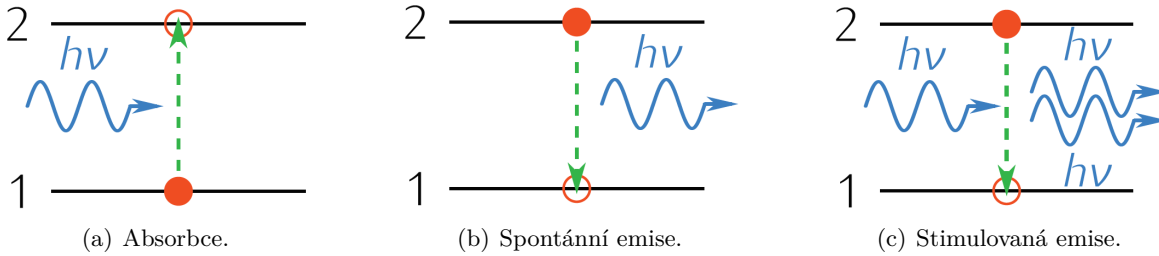
2.2 Princip generace laserového záření

LASER, z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v překladu zesílení světla stimulovanou emisí záření, je světelný zdroj, vyzařující koherentní monochromatické záření ve viditelné spektrální oblasti, tedy světelné vlny se souvislou fází a amplitudou v úzkém frekvenčním pásmu. Ilustrace tohoto záření (L_2) je zobrazena na obr. 2.2b, oproti tomu obr. 2.2a zobrazuje zdroj (L_1) nekoherentního polychromatického světla, např. wolframovou žárovku [22].



Obrázek 2.2: Ilustrace záření [22].

Princip vzniku laserového záření je založen na tzv. **stimulované emisi**. Tento jev nastává při interakci fotonu s elektronem atomu nebo molekuly, v látce obsahující oddělené kvantové energetické hladiny, tzv. aktivní prostředí. Toto medium je pak schopné zesílit jím procházející záření a mohou v něm nastat tři různé interakce, ilustrované na obr. 2.3 [23].



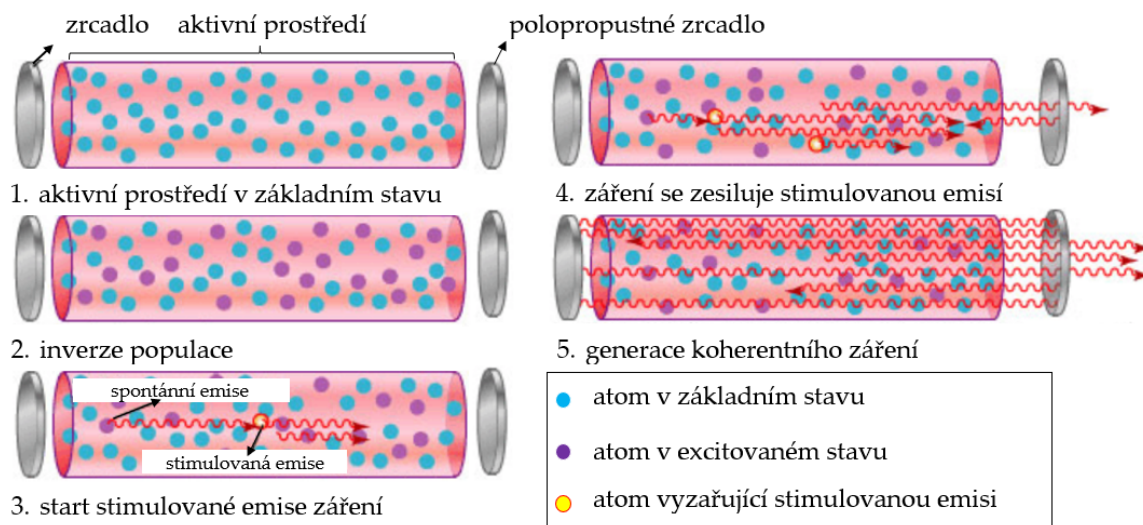
Obrázek 2.3: Emise záření [23].

Obr. 2.3 zobrazuje dvě energetické hladiny elektronu s energiemi $E_1 < E_2$. Elektron setrvává na základní hladině, dokud mu není dodána energie např. fotonem. Příklad, kdy dojde k absorpci (obr. 2.3a) nastane, když je energie tohoto fotonu rovna rozdílu $E_2 - E_1$. Elektron tuto energii absorbuje a přejde na vyšší energetickou hladinu. V případě spontánní emise (obr. 2.3b) se elektron nachází na hladině 2, a protože $E_2 > E_1$, má elektron snahu přejít zpět do energeticky výhodnějšího stavu tzn. na hladinu 1. Aby se tak stalo, musí tento elektron snížit svoji energetickou hodnotu, tj. o rozdíl $E_2 - E_1$. V případě spontánní emise se elektron této energie zbavuje v podobě elektromagnetického záření, jehož frekvenci popisuje vztah (2.1), kde h je Plankova konstanta [23].

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.1)$$

U **stimulované emise** (obr. 2.3c) se elektron nachází na hladině 2 a dopadá na něj elektromagnetická vlna s frekvencí vlny spontánně emitované. Tento elektron pak přechází na nižší energetickou hladinu 1 a současně emituje záření s energií E , dle vztahu (2.1). Elektromagnetická vlna, která na elektron dopadla a i ta, kterou vyzářil, má stejný směr i fázi, což má za následek zesílení původního vlnění. Aby docházelo k nepřetržité emisi, musí převládat přebytek částic na vyšší energetické hladině tzv. populační inverze. Aktivní prostředí laseru ovšem musí obsahovat prvky s tzv. **metastabilní hladinou**. Elektron takového atomu se pak po srážce s fotonem excituje na vyšší energetickou hladinu, vyzáří foton náhodným směrem a sestoupí na metastabilní hladinu. Elektron na metastabilní hladině vydrží $100\,000\times$ déle než na vyšší energetické hladině. Tento jev pak zajistí, že elektron setrvá, než dopadne další foton. Ten pak elektron stimuluje tak, že vyzáří foton, který se spojí s fotonem dopadlým [23, 24].

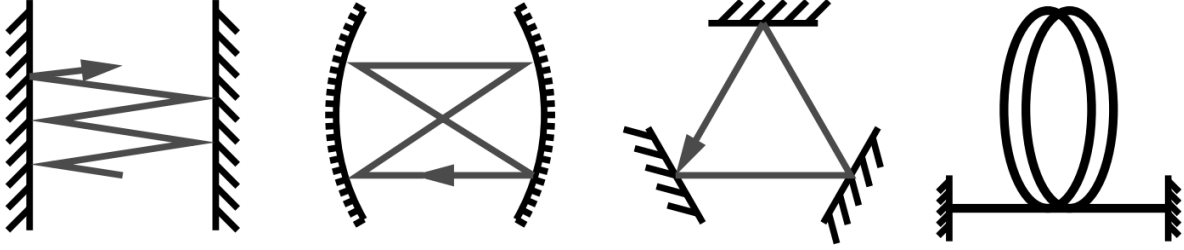
Aktivní prostředí je buzeno a tím je zajištěn přebytek částí ve vyšším energetickém stavu, tzv. inverzní populaci, aby mohlo dojít ke stimulované emisi záření. Aby počet stimulovaných emisí převýšil počet emisí spontánních, musí se aktivní prostředí nacházet v **rezonátoru** (obr. 2.4). Rezonátor je nejčastěji složen ze dvou zrcadel (některé typy ze tří a více), z nich jedno je částečně propustné. Fotony vzniklé stimulovanou emisí putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému a díky lavinovému efektu jejich počet neustále narůstá, protože opakovanými průchody přes aktivní prostředí se následně vniklé záření zesiluje. Jakmile dosáhne laserový svazek požadované intenzity, opouští rezonátor částečně propustným zrcadlem (obr. 2.4). U laserů určených pro průmyslové aplikace pak většinou vygenerovaný svazek putuje do expanderu, popř. reduceru (systém čoček a clon), který zlepšuje kvalitu svazku. Takto upravený svazek pak opouští laserový systém z laserové hlavičky. Protože ve všech částech laserového systému dochází k významným energetickým ztrátám a tím k jejich ohřevu, musí být výkonové lasery navíc opatřeny chladícím systémem (nejčastěji za pomoci proudící kapaliny) [23, 25].



Obrázek 2.4: Stimulovaná emise v rezonátoru [25].

2.3 Rezonátorová optika

Zařízení nazývané **optické rezonátory** se u laserů využívají nejen pro akumulaci optické energie, ale také jako frekvenční filtr. Základním principem jsou opakované odrazy mezi zrcadly, pomocí kterých se udržuje optická energie v uzavřeném prostoru. Obecně platí, že tato zrcadla musí mít takový tvar, aby se světlo udrželo v rezonátoru, tzn. po několika odrazech se dostalo do požadované dráhy. Obr. 2.5 zobrazuje různé typy rezonátorů [26].

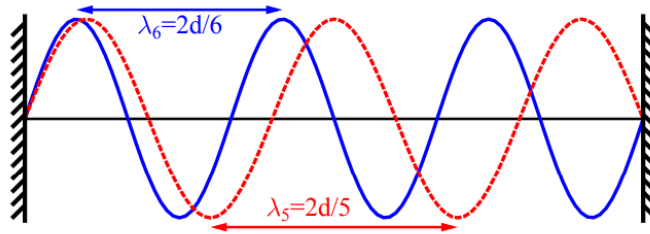


Obrázek 2.5: Zleva planární, sférický, kruhový a vláknový rezonátor [26].

Konstrukčně nejjednodušším provedením je Fabryův-Perotův planární rezonátor (FP), který je tvořen ze dvou rovnoběžně umístěných rovinných zrcadel (použit u polovodičových laserů, v tomto kontextu dále nazýván čipem). V případě tohoto typu se musí světlo zrekonstruovat po dvou odrazech, a to i včetně fáze (ta se při odrazu otáčí o π). Pokud je na zrcadlech nulové elektrické pole, pak se může v rezonátoru udržet záření splňující podmínku

$$d = \frac{q\lambda}{2} = \frac{qc}{2\nu}, \quad (2.2)$$

kde d je vzdálenost zrcadel (obr. 2.6, průměr FP rezonátoru), c je rychlost světla a q je celočíselný koeficient odpovídající počtu půlvln. Jedná se o tzv. podélný mód. Vlny záření o délkách, které nesplní tuto podmínku, se interferují destruktivně a takto rezonátor funguje jako frekvenční filtr. Rozsah frekvencí, jež splnily podmínku popsanou ve vzorci č. 2.2, určuje frekvenční interval. Reálně však rezonátor propouští všechny vlnové délky, jen je selektivně utlumí [26].



Obrázek 2.6: Podmínka pro λ v rezonátoru [26].

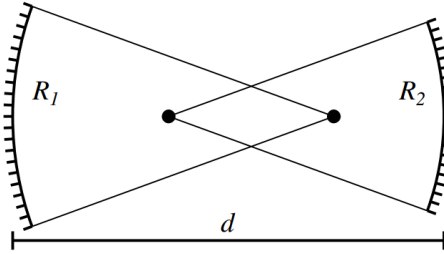
Volný frekvenční interval (v_f , frekvenční vzdálenost dvou vedlejších vlnových délek) a jeho střed (λ_q) je určen jako

$$v_f = \frac{c}{2d}, \quad \lambda_q = \frac{2d}{q}. \quad (2.3)$$

Rezonátor je stabilní pouze pokud je splněna podmínka

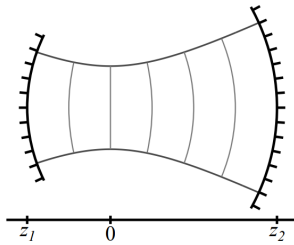
$$0 \leq \left(1 + \frac{d}{R_1}\right) \left(1 + \frac{d}{R_2}\right) \leq 1, \quad (2.4)$$

kde d je vzdálenost zrcadel a $R_{1,2}$ je poloměr křivosti, ten nabývá záporných hodnot v případě vyduťtého zrcadla a hodnot kladných v případě zrcadla vypouklého. Z tohoto vzorce vyplývá, že pro vytvoření rezonátoru existuje konečné množství kombinací. Rezonátor s vyduťtými zrcadly je zobrazen na obr. 2.7 [26].

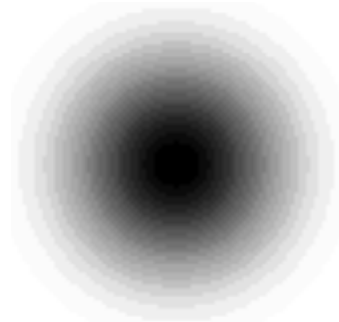


Obrázek 2.7: Rezonátor se sférickými vyduťtými zrcadly [26].

Kvůli destruktivním a nedestruktivním interferencím vln v rezonátoru se elektromagnetické pole ustálí do tzv. módů. Kromě již zmíněného podélného módu, jenž určuje vlnové spektrum, se módy dále dělí na příčné horizontální a příčné vertikální. Ty určují vyzařovací charakteristiku laseru a profil emitovaného svazku. Obr. 2.8a zobrazuje podélný a Obr. 2.8b příčný profil gaussovského svazku [26].



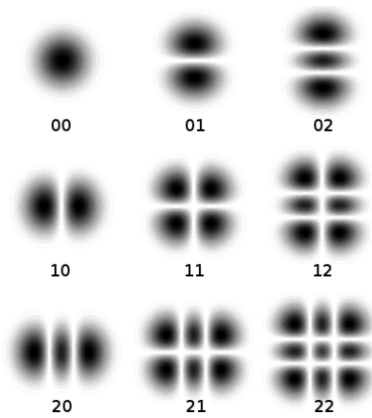
(a) Podélný profil.



(b) Příčný profil.

Obrázek 2.8: Gaussovský svazek [26].

Gaussovský svazek (obr. 2.8b) je základním módem označovaným jako TEM_{00} (Transverse Electromagnetic Mode, neboli příčný elektromagnetický režim). Název je odvozen od průběhu kopírující Gaussovy křivky. $TEM_{m,s}$ je obvyklé označení pro **Hermite-gaussovské** svazky (obr. 2.9). Index m značí počet uzlů stojatého vlnění v horizontální ose a s značí počet uzlů stojatého vlnění ve vertikální ose. Tvar jejich příčného profilu určuje geometrické uspořádání zrcadel v rezonátoru [27].



Obrázek 2.9: Hermite-gaussovské svazky [27].

2.4 Klasifikace

Přehled tří základních způsobů klasifikace laserů je uveden v tab. 2.1.

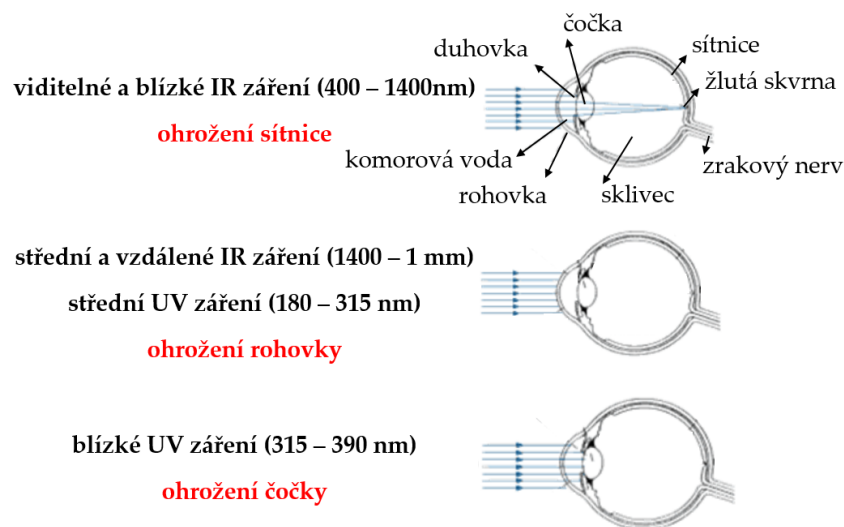
Podle typu aktivního prostředí:	
plynové	např. helium neon, helium cadmium nebo jódový
pevnolátkové	např. Nd:YAG, Neodym sklo nebo rubínový
diodové	např. GaAs, nebo GaN
kapalinové	coumarin, fluorescein, cyanin, rhodamin, oxazine
Podle vlnové délky:	
infračervené	780 nm až 1 mm
emitující ve viditelné oblasti	360 až 780 nm
ultrafialové	10 až 360 nm
Podle režimu práce:	
kontinuální	nepřetržitá generace záření
pulsní	pulsy s vysokou opakovací frekvencí
impulsní	vysoce energetické pulsy s nízkou opakovací frekvencí

Tabulka 2.1: Základní klasifikace laserů [23].

2.5 Bezpečnostní rizika laserového záření

Lidské oko dokáže kvůli své transparentnosti propustit elektromagnetické záření v rozsahu 370 nm až 1400 nm. Záření v UV oblasti ($\lambda < 350$ nm) je absorbováno na povrchu oka a při vyšších intenzitách dochází k poškození rohovky nebo čočky. Viditelné záření (380 - 790 nm) dopadá na sítnici (obr. 2.10). Pro tuto oblast funguje ochranný (korneální) reflex, který oko automaticky zavře, pokud má toto záření výkon větší než 1 mW. Blízká oblast NIR (780 - 1400 nm) je pro oko vůbec nejnebezpečnější, protože zde není žádný ochranný reflex a záření je cítit až po poškození sítnice. Ta se pak může zakřivit či odchlípnout. Rozdělení stanovuje norma ČSN EN 60825-1 ed. 3., aby napomohla při určení rizik a příslušných opatření. Klasifikace je rozdělena dle potenciálního poškození zraku a pokožky [23, 29].

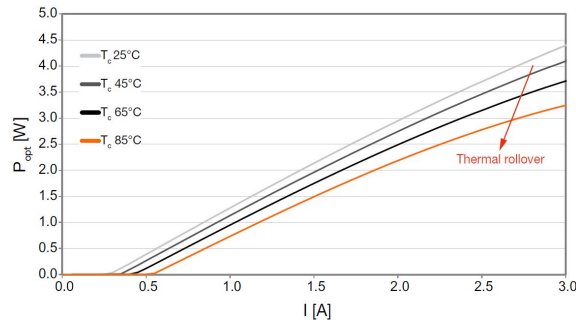
- **Třída 1** - zařízení bezpečná při dlouhodobém přímém sledování svazku paprsků.
- **Třída 2** - zařízení vyzařující viditelnou oblast elektromagnetického záření, která jsou bezpečná v případě chvilkového ozáření (0,25 s). Oko chrání korneální reflex.
- **Třída 3R** - záření může překročit přípustnou dávku (pětinásobek emise jako u třídy 2), riziko poškození je ovšem relativně nízké.
- **Třída 3B** - záření nebezpečné i při nahodilých pohledech, včetně difuzních odrazů. Může dojít i k malým poškozením pokožky.
- **Třída 4** - u těchto zařízení je pohled i ozáření pokožky velmi nebezpečné. Nebezpečné jsou i rozptýlené odrazy. Je zde velké riziko následného vzniku požáru [23, 29].



Obrázek 2.10: Ohrožení zraku laserovým zářením [23].

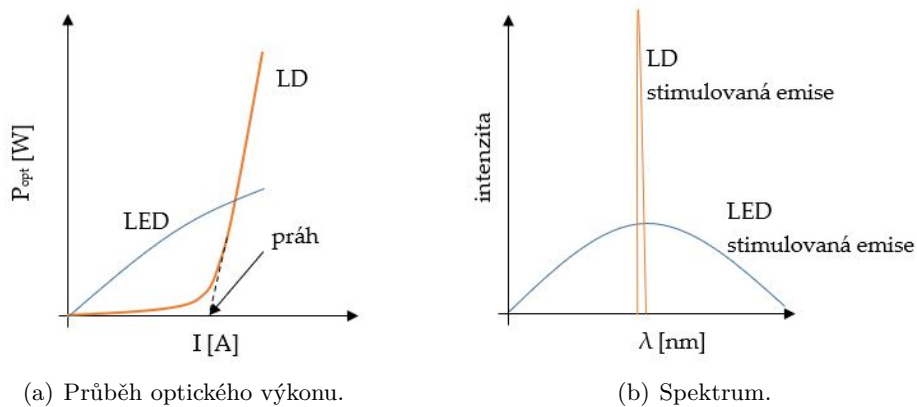
2.6 Charakteristiky laserových diod

Laserová dioda (**LD**) je luminescenční dioda, ve které dochází nad určitou proudovou hustotou ke stimulované emisi. K tomuto ději dochází při průchodu propustného proudu přechodem PN. Aktivní prostředí rezonátoru je tvořeno okolím PN přechodu, ve kterém dochází k injekci nosičů náboje, jejichž existenční doba je typicky 10^{-9} s. Následně dochází k rekombinaci a vyzáření fotonu s náhodnou fází a v náhodném směru, popř. absorpci energie krystalovou mřížkou doprovázenou oteplením polovodiče. Jedná se o spontánní emisi generující nekoherentní záření a LD se svojí emisivitou podobá světelné diodě (LED), tento provoz je nazýván podprahovým režimem [30].



Obrázek 2.11: Závislost optického výkonu na proudu LD pro různé teploty [31].

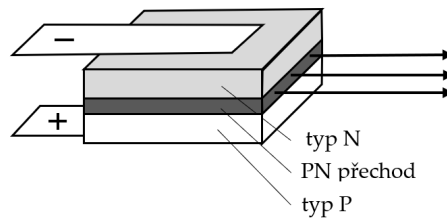
Hodnota prahového proudu (I_P) udává stav, kdy v aktivním prostředí dojde ke vzniku inverzní populace, a to generací fotonů s energií, která je rovna rozdílu energetických pásů předtím, než dojde k rekombinaci elektronů a děr. Tento foton pak stimuluje přechod elektronu na nižší energetickou hladinu a zapříčiní tak vyzáření fotonu ve stejné fázi i směru, tzn. vznik laserového záření (str. 15). Hodnota prahu narůstá se zvyšující se teplotou, po jejím překročení dochází k dramatickému nárůstu světelného výkon LD (obr. 2.11 a 2.12a), a také ke zúžení spektrální křivky záření (obr. 2.12b) [30].



Obrázek 2.12: Porovnání charakteristik LD a LED [30, 31].

2.7 Typy laserových diod

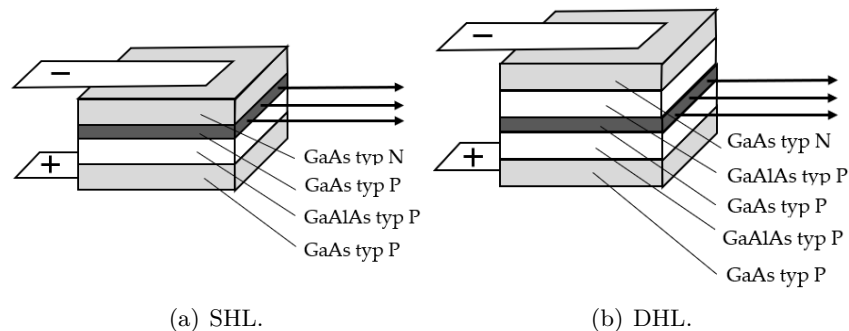
HoL (Homostucture Laser) – homostrukturní lasery tvořené jedním PN přechodem bez výrazné skokové změny indexu lomu a bez vysoké potenciálové bariéry. Šířka aktivní oblasti se pohybuje od 1 do 3 μm a je určena difúzní délkou menšinových nosičů. Díky této šířce je pro generaci záření třeba vysoké hustoty prahového proudu. Tento typ má velmi malou účinnost, protože vlivem úniku záření do okolních vrstev polovodičové struktury se čip zahřívá, proto LD může pracovat pouze v pulzním režimu a je nutné ji dostatečně chladit. Schéma homostrukturního čipu je zobrazeno na obr. 2.13 [30].



Obrázek 2.13: Homostrukturní čip [33].

HL (Heterostructure Laser) – heterostrukturní lasery obsahují heterostrukтуру, což je krystalická vrstevová struktura s alespoň jednou epitaxní vrstvou odlišného chemického složení s velmi blízkou mřížkovou konstantou a odlišnou šířkou zakázaného pásu. Tato struktura zabezpečuje podmínky k účinnému soustředění menšinových nosičů. Vlnovod je vymezen skokovou změnou indexu lomu v oblastech heteropřechodů, která je funkcí rozdílu šířky zakázaného pásu u sousedních vrstev. Dle počtu přechodů se tyto lasery dělí na

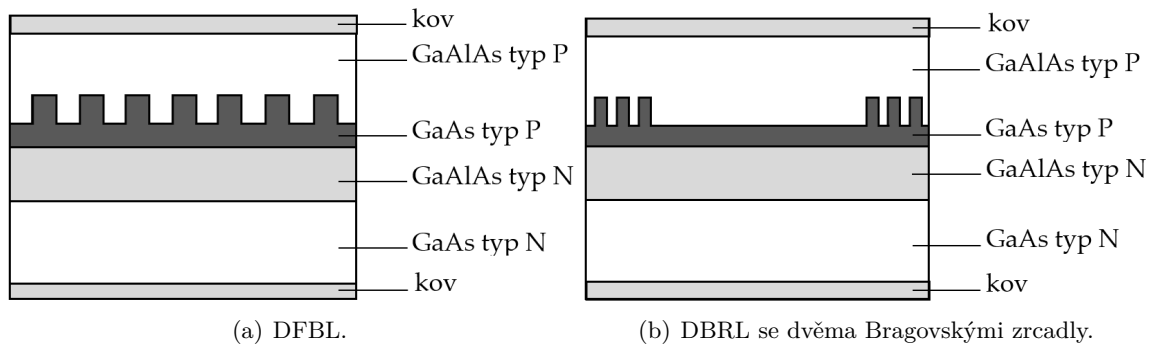
- **SHL** (Single Heterostructure Laser, obr. 2.14a) HL s jednou heterostrukturou,
- **DHL** (Double Heterostructure Laser, obr. 2.14b) HL s dvojitou heterostrukturou. Přidáním struktury bylo dosaženo větší účinnosti [30, 33].



Obrázek 2.14: Heterostrukturní čip [33].

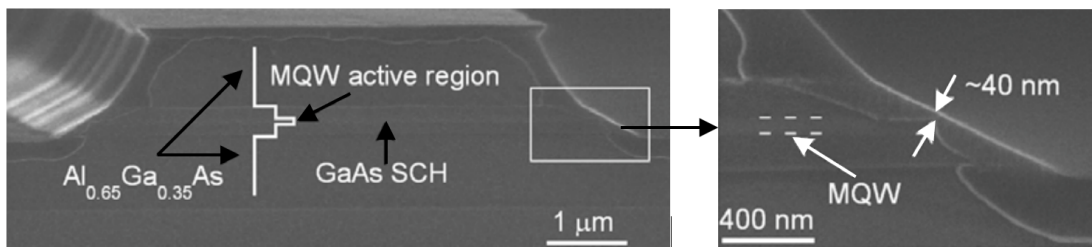
DFBL (Distributed Feed Back Laser) – lasery s rozloženou zpětnou vazbou (obr. 2.15a), jejichž funkce se zakládá na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Tyto čipy mají rezonátory bez zrcadel, realizované pomocí difrakčních mřížek tzn. prostorových periodických struktur, díky kterým se uskutečňuje zpětná vazba. Ta vzniká v důsledku toho, že elektromagnetická vlna, která se šíří jedním směrem, je trvale vázána do opačného směru Braggovským rozptylem. Mřížka se vyleptává do aktivní plochy. Nahrazení zrcadlového rezonátoru optickou mřížkou umožní provoz v jednom podélném módu s velmi úzkou spektrální šířkou (< 1 nm). Tyto lasery jsou vhodné pro systémy integrované optiky [30, 33].

Do této kategorie lze také zařadit LD s Braggovými zrcadly neboli **DBRL** (Distributed Bragg Reflector Laser), které mají mřížku posunutou mimo aktivní oblast (neovlivňuje průběh rekombinace). Je tak oddělena oblast generace záření a kladné zpětné vazby. Čipy lze realizovat buďto s jedním, nebo dvěma (obr. 2.15b) Braggovými zrcadly [30, 33].



Obrázek 2.15: Lasery s rozloženou zpětnou vazbou [33].

QWL (Quantum Wells Laser) – lasery s kvantovými jámami mají dvojistou heterostrukturu, která zde představuje pravoúhlou potenciálovou jámu ve vodivostním i valenčním pásu polovodiče. Je zde extrémně tenká aktivní vrstva, označovaná jako kvantová jáma. Na této vrstvě se při generaci záření uplatňují kvantové jevy a její šířka určuje vlnovou délku záření. Epitaxní technologií lze vytvořit aktivní vrstvu tenčí než 20 nm, běžná tloušťka se pohybuje okolo 10 nm. V současnosti již lze realizovat aktivní vrstvu tvořenou jedinou atomovou rovinou. Příklad šířky kvantové jámy vyobrazuje obr. 2.16 [33, 34].



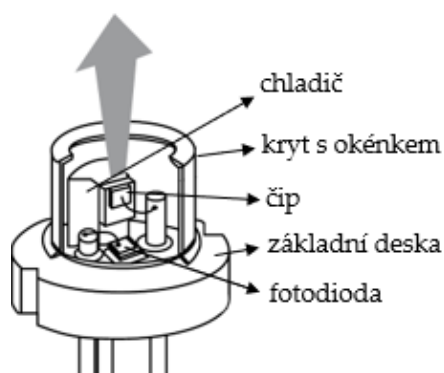
Obrázek 2.16: Struktura AlGaAs kvantové jámy [34].

Podle místa vyzařování lze LD rozdělit na **EEL** (Edge Emitting Laser) – hranově vyzařující lasery, které vyzařují z přechodové hrany a **VCSEL** (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers – plošně vyzařující lasery), které emitují z plochy rovnoběžné na rovinu PN přechodu. U VCSEL jsou použity transparentní materiály substrátu, proto se z plochy emitované záření odráží od kovových kontaktů. Díky tomu má svazek VCSEL mnohem menší divergenci než EEL. S tím je spojená i účinnost navazování světla do optických vláken, která u VCSEL dosahuje 80 %. Porovnání divergencí obou typů zobrazuje obr. 2.17 [33].



Obrázek 2.17: Příčný řez svazku [35].

Polovodičový čip je obvykle upevněný na chladič, ten bývá přilepen k základní desce, ze které vychází kryt s okénkem. Záření z polovodičového čipu vychází v obou směrech, proto lze opačného směru, než je směr emitace z pouzdra, využít pro monitorování (poměr emitace obou směrů se může lišit). Za tímto účelem jsou využívány fotodiody (PD) umístěné v blízkosti čipu. Tato monitorovací dioda má samostatný vývod z pouzdra a lze ji zapojit ve fotovoltaiickém i fotorezistivním režimu. LD, jejíž světelný výstup se vyvazuje do optického vlákna, navíc obsahují čočku se zrcátkem, která výrazně usnadňuje navázání paprsků. Takto zapouzdřená dioda je hermeticky uzavřena [33].



Obrázek 2.18: Pouzdření laserové diody [36].

Kapitola 3

Příprava experimentů

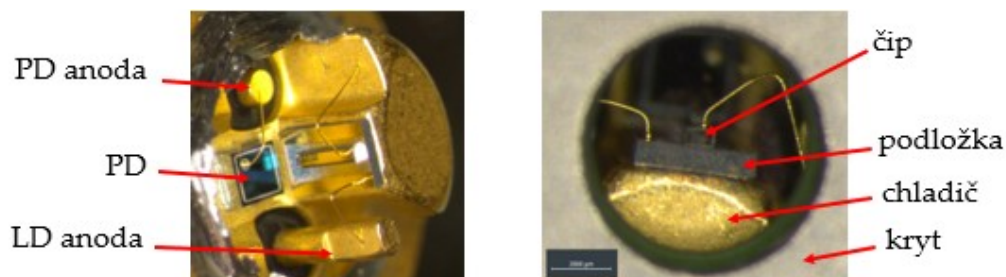
V této kapitole jsou popsány parametry vybraných laserových diod použitých pro experimentální měření, dále realizace proudového řízení a jednotlivé experimenty.

3.1 Vybrané laserové diody

Pro experimenty jsou vybrány LD OSRAM **PLT5 520B** (Příloha č. 1) a **PLT5 450B** (Příloha č. 2, neobsahuje PD) s optickým výkonem 80 mW. Jedná se o cenově dostupné, jednomódové, hranově vyzařující LD (EEL), spadající do třídy bezpečnosti 3R. Polovodičové čipy z heteropřechodů InGaN (Indium Gallium Nitride) jsou instalovány v kovovém hermeticky uzavřeném pouzdře TO56. Tento typ je vybrán právě kvůli těmto vlastnostem, díky kterým také nachází uplatnění v lékařských aplikacích, biotechnologii, spektroskopii, nebo v projekční technice. Základní parametry vybraných diod jsou obsaženy v tab. 3.1 a vnitřní strukturu **PLT5 520B** zobrazuje obr. 3.1.

LD	PLT5 520B	PLT5 450B
maximální proudové zatížení	240 mA	165 mA
vlnová délka	515 - 530 nm	440 - 460 nm
FWHM	1 nm	2 nm
provozní teplota	-20 až +60 C°	-40 až +70 C°
prahový proud	40 - 90 mA	17 - 60 mA

Tabulka 3.1: Základní parametry LD [Příloha č. 1 - 2].



Obrázek 3.1: Struktura LD **PLT5 520B** pod mikroskopem.

3.2 Proudové řízení použitých LD

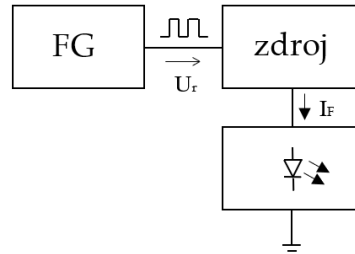
Diody jsou při experimentech provozovány ve dvou režimech proudového řízení.

- **Kontinuální režim (CW)** - konstantní (kontinuální) hodnota proudu.
- **Pulzní-šířkové řízení (PWM)** - maximální zvolená hodnota proudu s PWM.

Pro realizaci těchto režimů je použita sestava obsahující laboratorní zdroj THORLABS ITC510 a montážní stojan TCLDM9 [38]. Zdroj je nízkošumový a lze jím regulovat proud do $1\text{ A} \pm 1\text{ mA}$ s minimálním krokem $0,1\text{ mA}$, umožňuje také modulovat výstup pomocí signálu z externího zdroje. Pro tento účel je použit funkční generátor (dále jen FG) RIGOL DG1000Z generující obdélníkové řídicí napětí U_r pro pulzně šířkovou modulaci (PWM) proudu. Vliv rychlosti náběžné a sestupné hrany řídicího signálu FG není uvažován při určení nejistot měření ($< 5\text{ ns}$). Frekvence PWM signálu je 10 kHz , jedná se zhruba o polovinu intervalu určeného integrační dobou spektrometru (cca 500 Hz) a možného zobrazení pravoúhlého PWM pomocí proudové sondy (cca 20 kHz). Sestava je zobrazena na obr. 3.2a a blokové schéma PWM řízení na obr. 3.2b.



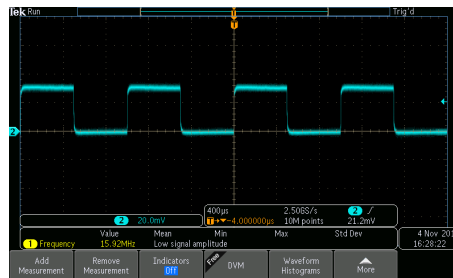
(a) Sestava [38].



(b) Blokové schéma PWM řízení.

Obrázek 3.2: Realizace proudového řízení.

Průběh světelného výstupu LD při PWM režimu řízení má požadovaný obdélníkový tvar, jak zobrazuje průběh v čase na obr. 3.3, který je měřen detektorem s fotodiodou (New Focus 2001) připojeným k osciloskopu. Výsledný průběh napětí odpovídá průběhu světelného výstupu.

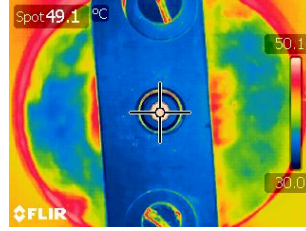


Obrázek 3.3: Časový průběh světelného výstupu LD.

Maximální amplitudy proudů volené s ohledem na doporučené katalogové hodnoty

- **PLT5 520B** - 250 mA,
- **PLT5 450B** - 150 mA.

Zdroj umožňuje regulaci teploty pouzdra LD od -45 do $+145 \pm 0,1$ °C. Laboratorní měření jsou provedeny nejprve bez možnosti regulace teploty a následně znovu s regulací $\vartheta = 50 \pm 0,1$ °C. LD jsou připevněny dosedovou plochou na měděnou destičku vyhřívanou pomocí TEC (thermo-electric cooler, termoelektrický chladič), vyživající Petrierova jevu. Termogram takto upevněné LD **PLT5 450B** zobrazuje na obr. 3.4 (termokamera FLIR T200). Teplota světelné laboratoře je klimatizací udržována v rozmezí 23 až 24 °C.



Obrázek 3.4: Termogram neemitující LD **PLT5 450B** při $\vartheta = 50 \pm 0,1$ °C.

3.3 Experimenty

V rámci experimentů je provedena

- **fotometrie** – měření světelného toku (ϕ),
- **spektrometrie** – měření spektrálních křivek, dominantní vlnové délky (λ_D) a šířky spektra v polovině maxima (FWHM),
- **goniofotometrie** – měření prostorové svítivosti (příčné profily),

Pro jednotlivé experimenty je stanovena **kombinovaná nejistota** měření

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3.1)$$

kde u_A je **standardní nejistota typu A** způsobená náhodnými vlivy - směrodatná odchylka deseti opakovaně naměřených hodnot, definovaná jako

$$u_{Ax} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.2)$$

kde n je soubor hodnot a i index naměřené hodnoty. **Standardní nejistota typu B** značena u_B ze vzorce (3.1) je způsobená známými, nebo odhadnutelnými příčinami, určená individuálně u jednotlivých zařízení.

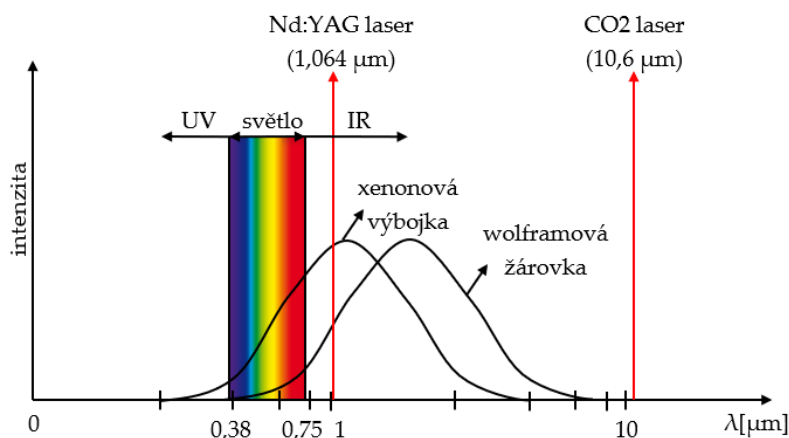
Kapitola 4

Experiment I. - světelný tok a spektrum

Tato kapitola se zabývá měřením světelných spekter, dominantní vlnové délky (λ_D), šířky spektra v polovině maximální hodnoty (FWHM) a světelného toku (ϕ). Je zde popsána měřicí aparatura a principy detekce, dále pak následuje prezentace naměřených hodnot a souhrn zjištěných poznatků.

4.1 Světelné spektrum a měřené veličiny

Světlo je viditelné příčné postupné elektromagnetické vlnění v rozsahu frekvencí od $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz do $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz. Předpokládá se, že zdravý člověk ve středním věku vnímá barvy od vlnové délky 380 – 390 nm (fialová barva) po vlny dlouhé 760 – 780 nm (tmavě červená barva) [40]. Pokud je elektromagnetická vlna kratší než 380 nm, hovoříme o blízkém ultrafialovém záření (NUV, near ultraviolet). Oblast vlnových délek delších než 780 nm nazýváme blízké infračervené záření (NIR, near infrared) [39]. Ilustrace na obr. 4.1 zobrazuje spojité spektrální křivky konvenčních zdrojů (xenonová výbojka a wolframová žárovka), a také spektrum dvou v průmyslu nejvíce používaných laserů (Nd:YAG a CO₂). **Spektrometr** je zařízení pro měření světelného spektra využívající rozkladu světla za pomoci disperze na optickém hranolu, nebo pomocí difrakce na rovinné mřížce [41].

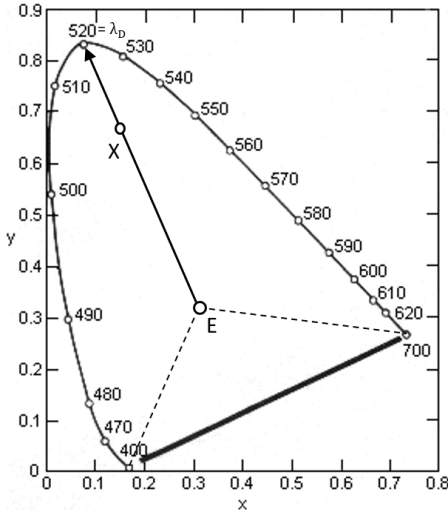


Obrázek 4.1: Spektrum Nd:YAG a CO₂ laseru, wolframové žárovky a xenonové výbojky [42].

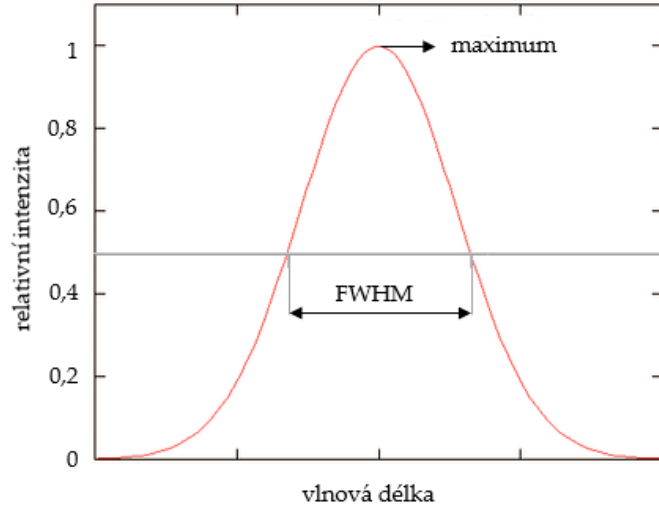
Pro charakterizaci světelného spektra vybraných LD jsou zvoleny následující parametry, definované mezinárodní komisí pro osvětlování CIE (Commission internationale de l'éclairage).

Dominantní vlnová délka (λ_D) - způsob charakterizace spektra z hlediska monochromatického světla. Určuje se z trichromatického diagramu, pomocí proložení kolmice od středu C_E ($C_x = 0,333$, $C_y = 0,333$), přes určený bod X , až po jeho okraj, jak znázorňuje obr. 4.2a. Na rozdíl od vlnové délky ve spektrálním maximu, dominantní vlnová délka zohledňuje veškeré vlnové délky obsažené v naměřeném světelném spektru [39].

Šířka spektra v polovině maxima (FWHM) - určení této vzdálenosti zobrazuje obr. 4.2b [39].



(a) Určení dominantní vlnové délky.



(b) Určení FWHM.

Obrázek 4.2: Parametry charakterizující světelné spektrum [39].

Kromě parametrů charakterizující spektrum je měřen také **světelný tok**, definovaný jako

$$\phi = 683 \int_0^\infty \frac{d\phi_e(\lambda)}{\lambda} V(\lambda) d\lambda \text{ [lm]}, \quad (4.1)$$

kde $V(\lambda)$ je matematická aproximace spektrální citlivosti lidského oka, 683 reprezentuje přepočítávací konstantu při $\lambda = 555 \text{ nm}$ a ϕ_e je zářivý tok definovaný jako

$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \text{ [W]}, \quad (4.2)$$

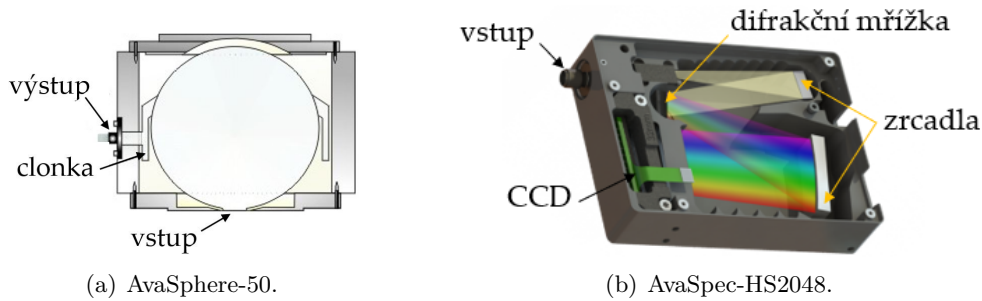
kde Q_e je zářivá energie [39].

4.2 Použité měřicí zařízení

Kvůli zjištění hodnot prahových proudů, jakožto základního parametru LD, je jako první měření světelný tok (ϕ). Měření začíná vstupem světla do integrační koule **AvaSphere-50** [43]. Na vnitřní stěně této koule o průměru 50 mm dochází k několikanásobným difuzním odrazům, které jsou barevně neselektivní, tzn. činitel odrazu není závislý na vlnové délce. Povrch vnitřní stěny je pokryt polytetrafluorethylenem (PTFE), jehož vlastnosti se blíží Lambertovu povrchu. Jedná se o materiál poskytující více než 98% odrazivost v rozsahu světelného záření. Za těchto předpokladů je na celém povrchu vnitřní stěny stejná hodnota osvětlenosti, definovaná jako

$$E_v = \frac{d\phi}{dS} [\text{lx}], \quad (4.3)$$

kde S je plocha. Osvětlenost je tedy přímo úměrná velikosti světelného toku ϕ (4.1). K výstupu je připojen optický kabel sbírající homogenizovaný světelný signál. Tento výstup je nezávislý na úhlových vlastnostech zdroje a je nutné jej zastínit clonkou, aby bylo zabráněno vstupu prvních odrazů do detekčního vlákna. Schématický řez AvaSphere-50 je zobrazen na obr. 4.3a foto na obr. 4.4a.



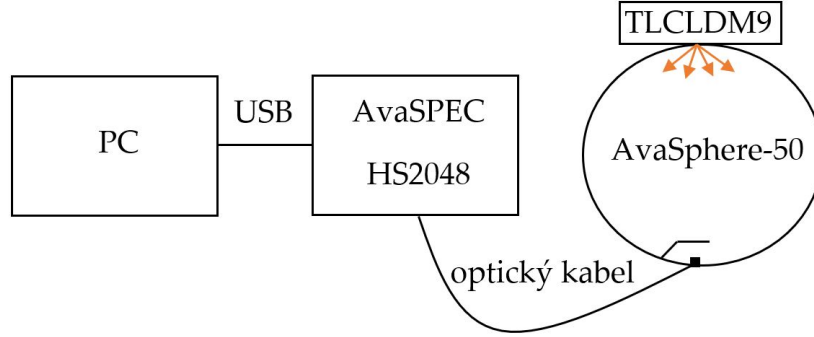
Obrázek 4.3: Schématické řezy použitých komponent [43, 45].

Homogenizované světlo je vedeno pomocí optického kabelu do spektrometru **AvaSpec-HS2048**. Světlo vstupuje do zařízení prostřednictvím standardního konektoru SMA-905 a je následně kolimováno sférickým zrcadlem. Mřížka (500 čar na mm) rozkládá kolimované světlo, které je poté druhým sférickým zrcadlem zaostřeno. Obraz spektra se promítá na pole detektorů. Uspořádání optické lavice s více toroidními zrcátky zajišťuje, že bude světlo z výstupu vlákna promítnuto na pole detektoru [44, 45]. Schématický řez AvaSpec-HS2048 je zobrazen na obr. 4.3b a foto na obr. 4.4b.



Obrázek 4.4: Foto zařízení [43, 44].

Jako detektor je použito CCD (Charge-Coupled Device, zařízení s nábojově vázanými prvky). Jedná se zařízení pro detekci obrazu, u AvaSpec-HS2048 je to nechlazený detektor s 2048 pixely o rozteči pixelů 14 μm . Spektrometr komunikuje s PC pomocí USB rozhraní. Jako programové prostředí pro zpracování naměřených dat byl použit AvaSoft 8.2. Blokové schéma měřicí sestavy pro měření světelného toku zobrazuje obr. 4.5.



Obrázek 4.5: Sestava pro měření světelného toku.

Zařízení se nepodařilo zkalibrovat pro měření absolutních hodnot radiometrických a fotometrických veličin. Světelný tok byl tedy nejprve naměřen v relativních hodnotách (nejistota dle kalibračního listu 5 %). Po změření prostorové svítivosti (příčné profily, str. 42) pomocí goniofotometru byl určen světelný tok dle vztahu

$$d\phi = I_s \cdot d\Omega. \quad (4.4)$$

Dle těchto údajů byly následně relativní hodnoty světelného toku normalizovány na absolutní. Souhrnná nejistota obou použitých, na sobě nezávislých měřidel, byla určena jako

$$u_b = \sqrt{u_{b_1}^2 + u_{b_2}^2} = \sqrt{5^2 + 2,8^2} = 5,7 \%, \quad (4.5)$$

kde u_{b_1} odpovídá nejistotě spektrometru a u_{b_2} nejistotě goniofotometru (výpočet na str. 41). Kvůli neprovedené kalibraci není možné použít sestavu s integrační koulí a optickým kabelem pro měření spektrálních křivek a parametrů, ty jsou proto měřeny pouze za pomoci spektrometru v bodě H 0°, V 0° ve vzdálenosti 20 cm. Jedná se o vzdálenost, kdy je možné v celém proudovém rozsahu nastavit dostatečný integrační čas tak, aby bylo dosaženo optimální saturace detektoru. Spektrometr AvaSpec-HS2048 má mřížku 500 linek/mm a šterbinu 50 μm , dle katalogového listu je FWHM = 5,5 nm. Nejistota byla určena jako

$$u_b = \frac{1/2 \cdot \text{FWHM}}{\sqrt{3}} = 1,56 \text{ nm}, \quad (4.6)$$

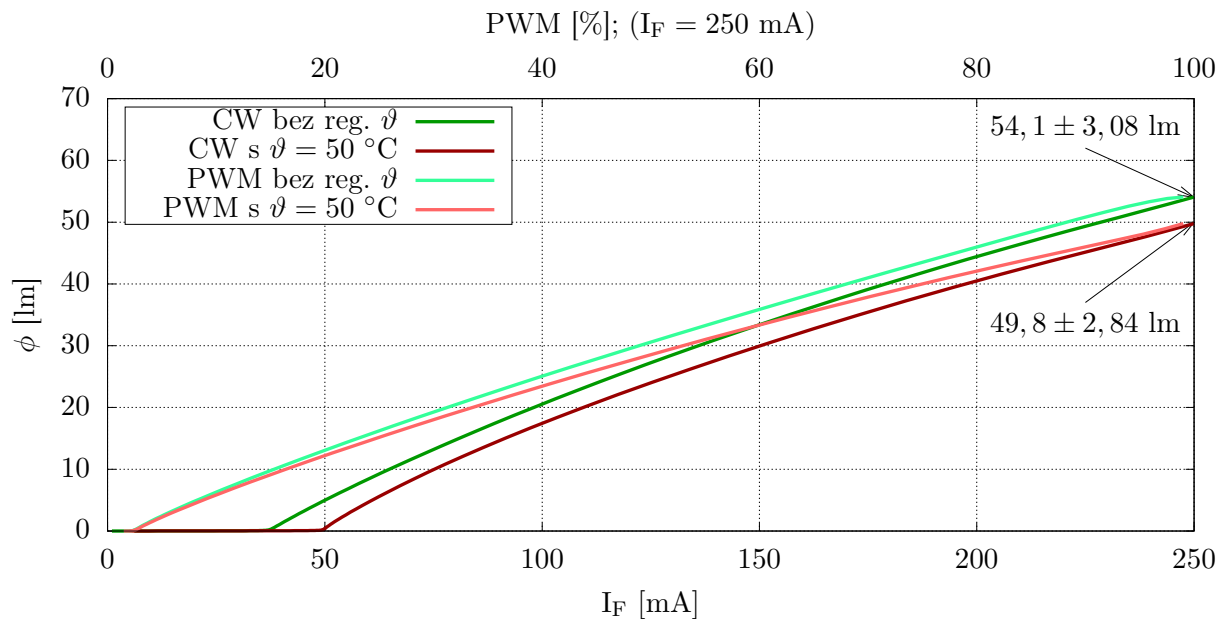
kde $\sqrt{3}$ je koeficient pro rovnoměrné rozložení [44].

4.3 Měření fotometrických a spektrálních parametrů

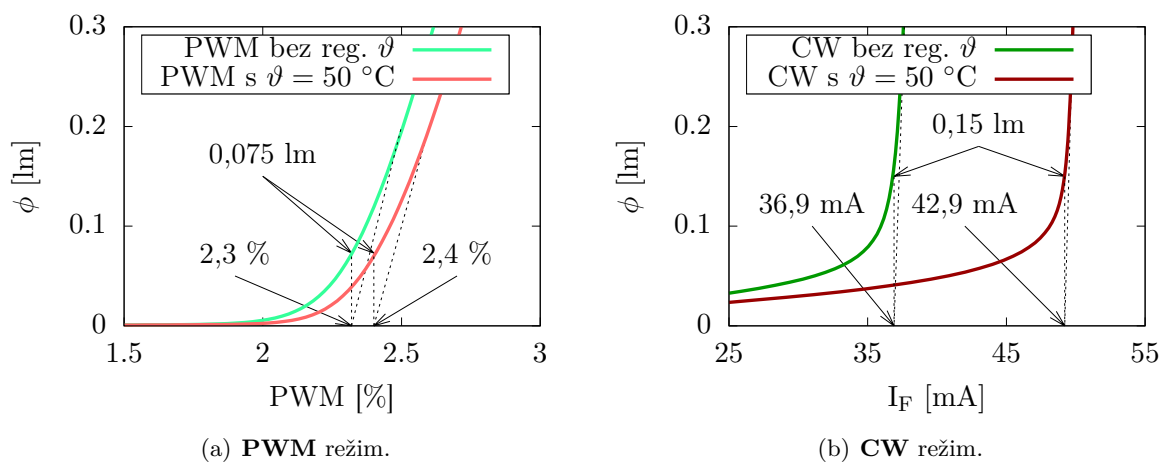
Následuje prezentace výsledků měření fotometrických a spektrálních parametrů formou grafů s vyznačenými hodnotami, které jsou následně okomentovány v souhrnu měření na str. 37.

Fotometrie LD **PLT5 520B**,

- obr. 4.6 zobrazuje průběh světelného toku v celém měřeném rozsahu proudů,
- obr. 4.7 zobrazuje průběh světelného toku v okolí prahů pro oba režimy provozu.



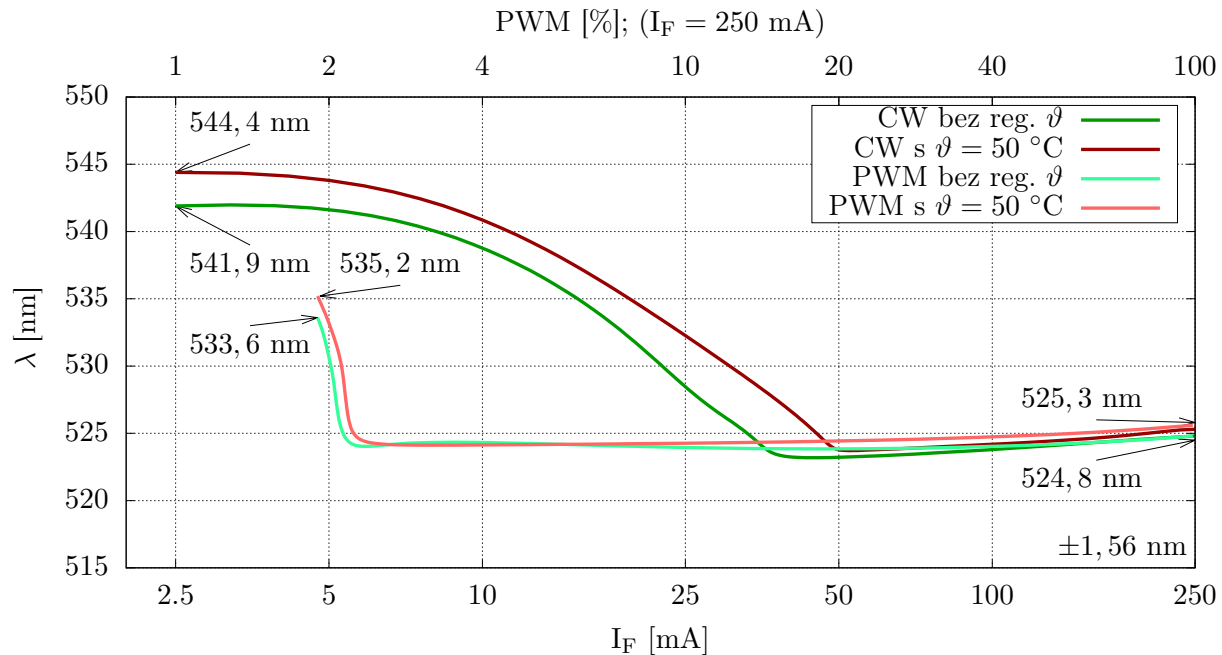
Obrázek 4.6: Závislost světelného toku na střední hodnotě proudu **LD PLT5 520B**.



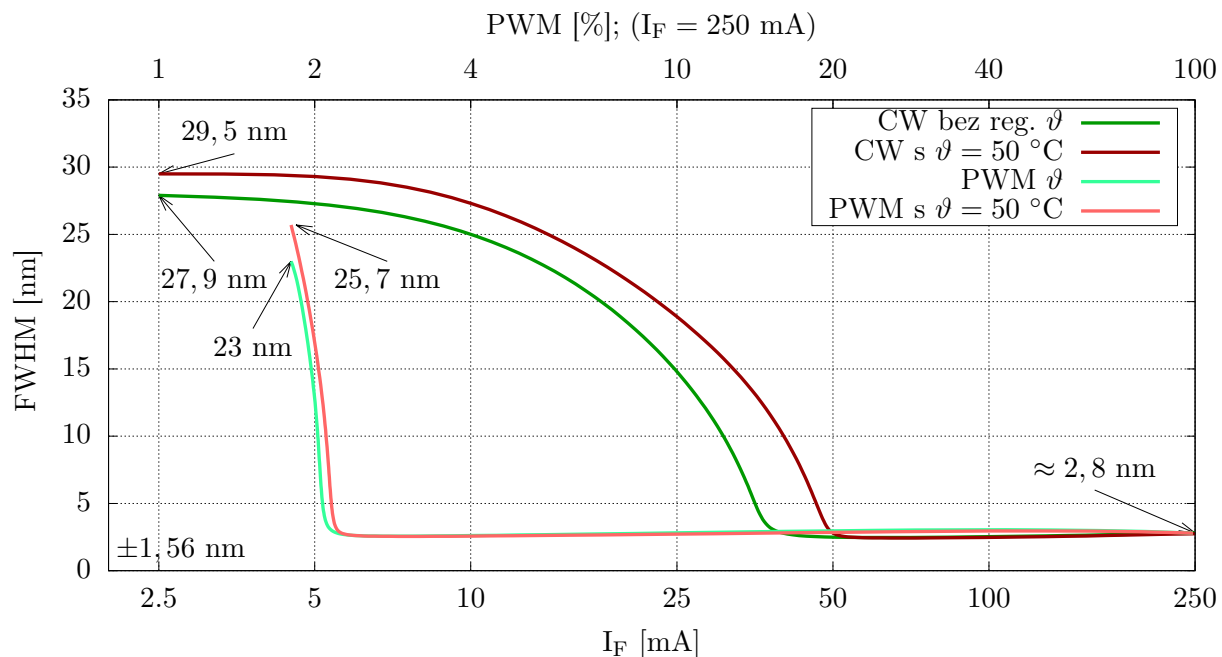
Obrázek 4.7: Okolí prahů **LD PLT5 520B**.

Spektrometrie LD **PLT5 520B**,

- obr. 4.8 zobrazuje průběh dominantní vlnové délky (λ_D),
- obr. 4.9 zobrazuje průběh šířky spektra v polovině maximální hodnoty (FWHM).



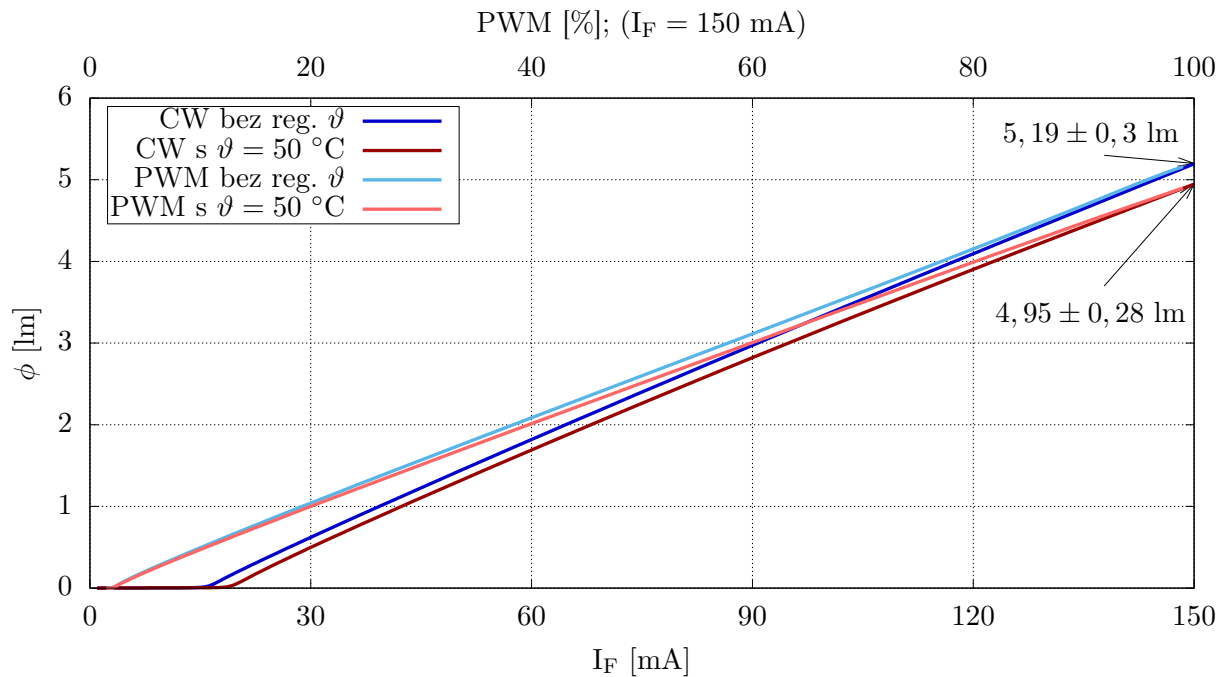
Obrázek 4.8: Závislost dominantní vlnové délky na střední hodnotě proudu **LD PLT5 520B**.



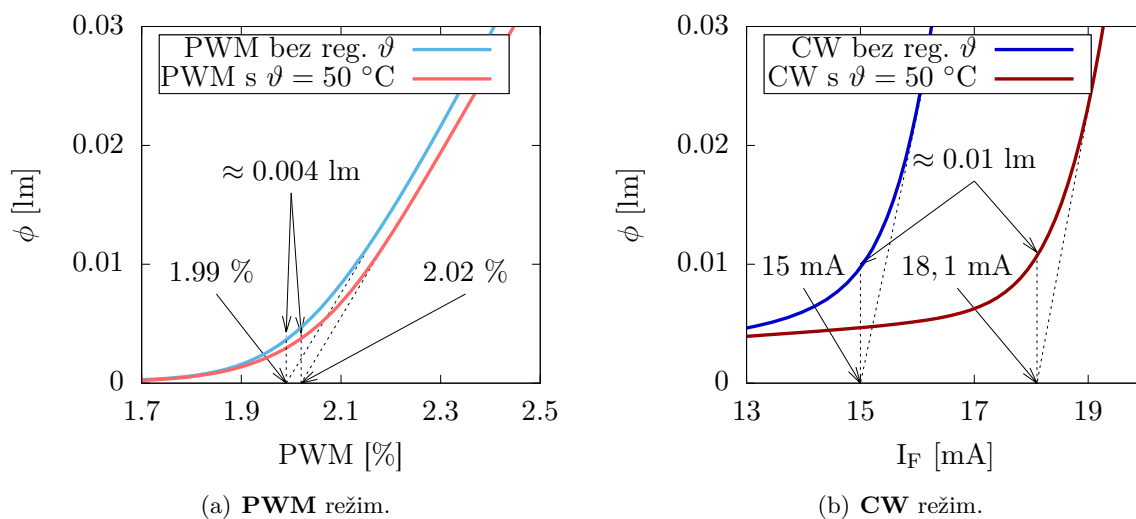
Obrázek 4.9: Závislost FWHM na střední hodnotě proudu **LD PLT5 520B**.

Fotometrie LD **PLT5 450B**,

- obr. 4.10 zobrazuje průběh světelného toku v celém měřeném rozsahu proudů,
- obr. 4.11 zobrazuje průběh světelného toku v okolí prahů pro oba režimy provozu.



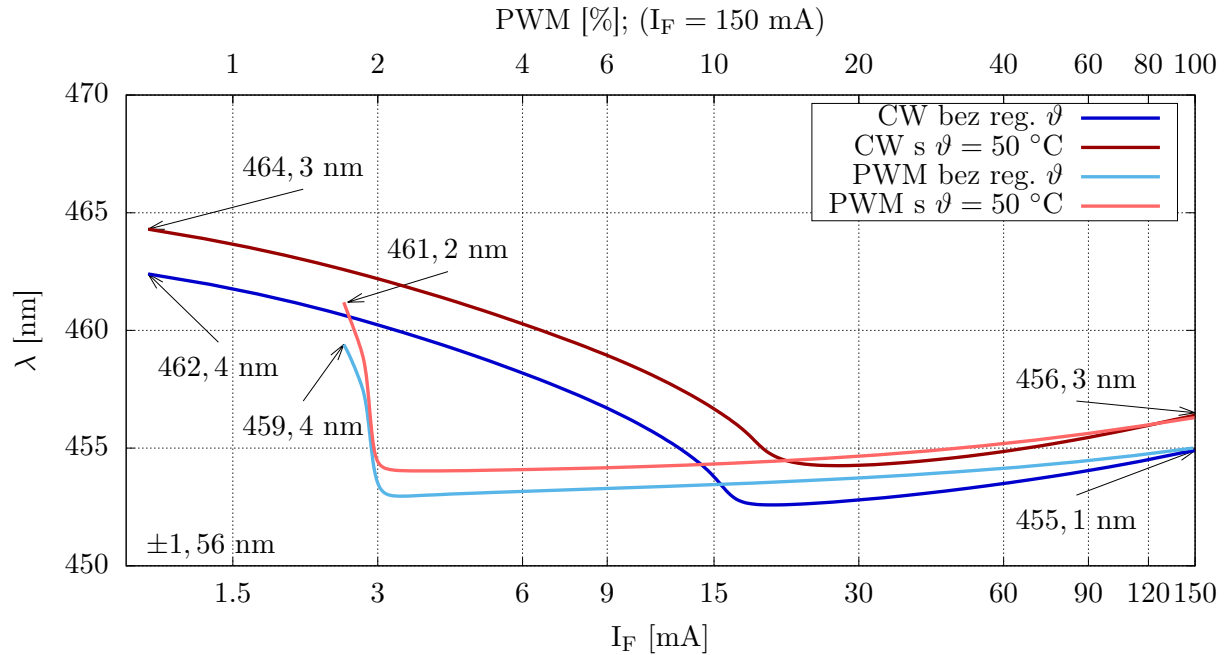
Obrázek 4.10: Závislost světelného toku na střední hodnotě proudu **LD PLT5 450B**.



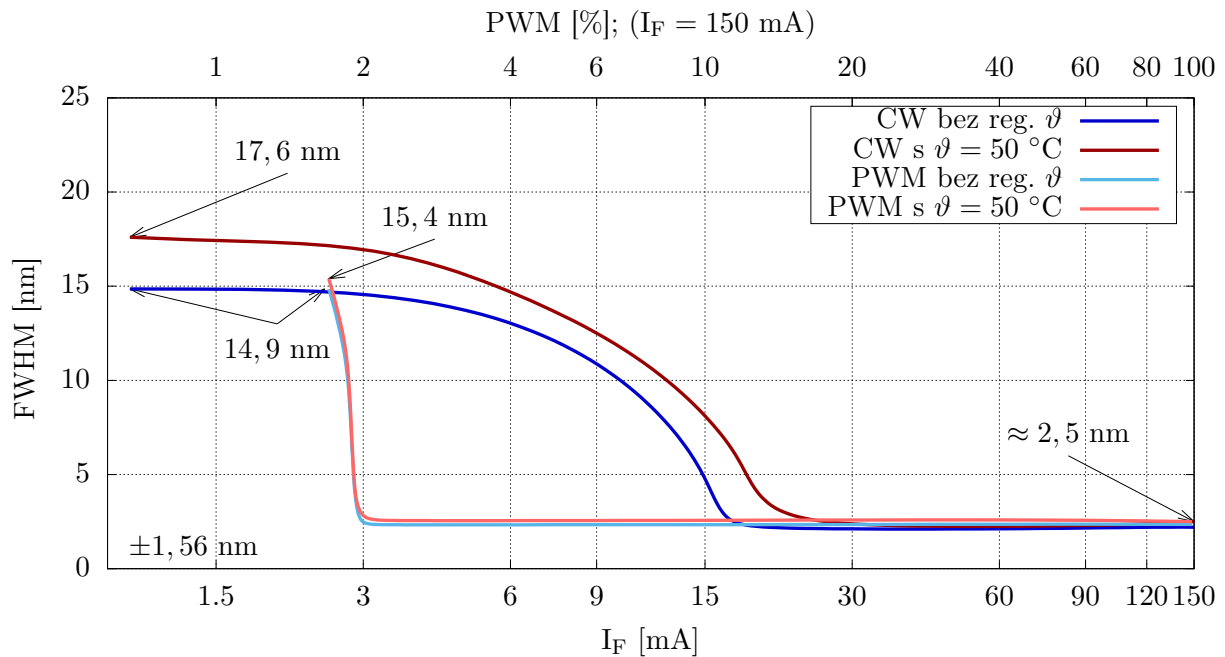
Obrázek 4.11: Okolí prahů **LD PLT5 450B**.

Spektrometrie LD **PLT5 450B**,

- obr. 4.8 zobrazuje průběh dominantní vlnové délky (λ_D),
- obr. 4.13 zobrazuje průběh šířky spektra v polovině maximální hodnoty (FWHM).

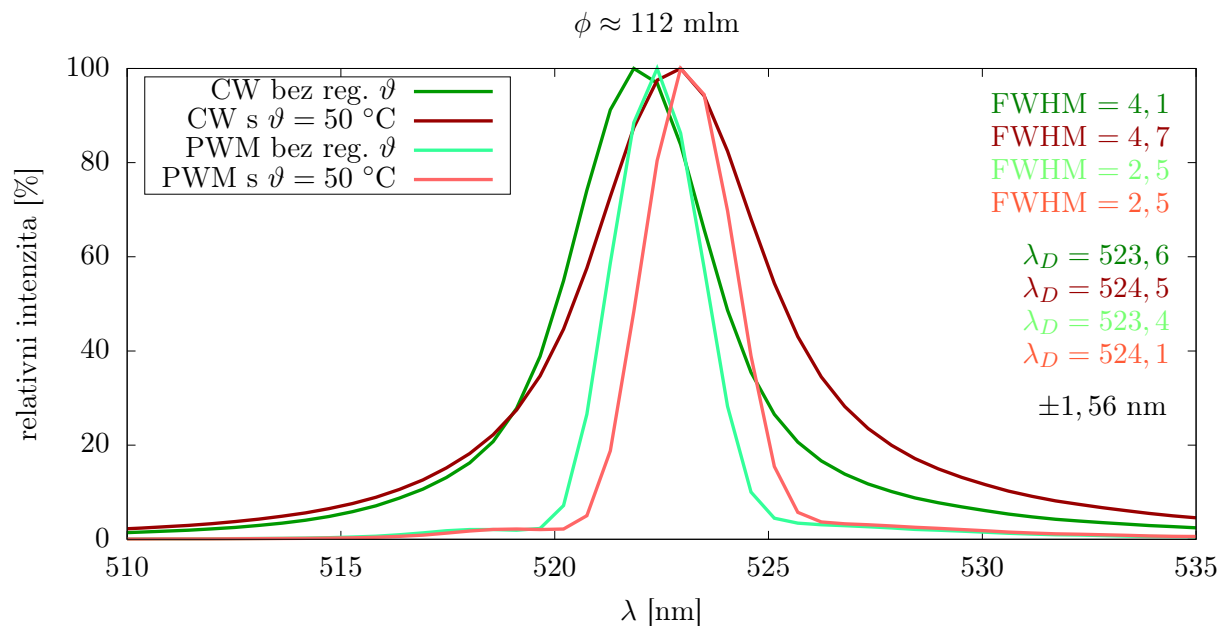


Obrázek 4.12: Závislost dominantní vlnové délky na střední hodnotě proudu **LD PLT5 450B**.



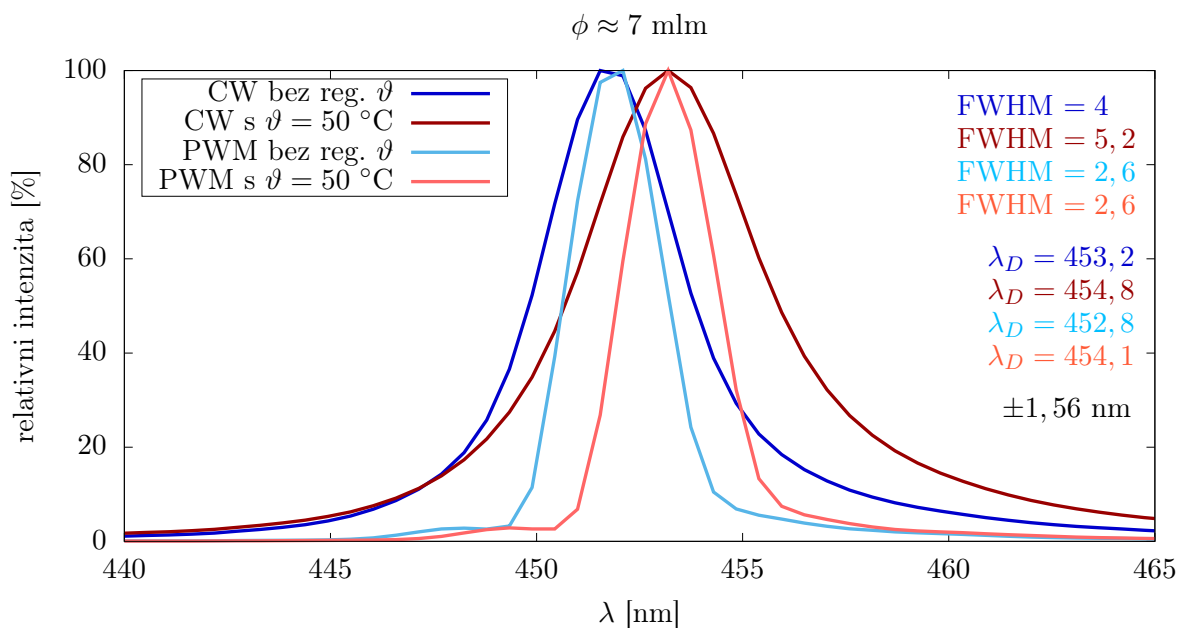
Obrázek 4.13: Závislost FWHM na střední hodnotě proudu **LD PLT5 450B**.

Obr. 4.14 zobrazuje **spektrální křivky LD PLT5 520B** při $\phi \approx 112$ mlm, jedná se o hodnotu odpovídající přibližně polovině intervalu světelných toků při prahu v **CW** a **PWM** režimu,



Obrázek 4.14: Spektrální křivky **LD PLT5 520B** při $\phi \approx 112$ mlm.

Obr. 4.15 zobrazuje **spektrální křivky LD PLT5 450B** při $\phi \approx 7$ mlm, jedná se opět o hodnotu odpovídající polovině intervalu světelných toků při prahu v **CW** a **PWM** režimu,



Obrázek 4.15: Spektrální křivky **LD PLT5 450B** při $\phi \approx 7$ mlm.

4.4 Souhrn měření fotometrických a spektrálních parametrů

Fotometrie - měření světelného toku ϕ ze str. 32 (obr. 4.6 a 4.7) a str. 34 (obr. 4.10 a 4.11).

- Při **CW** režimu řízení je svícení LD pozorováno již od $0,1 \pm 0,1$ mA, s možnou detekcí světelného toku od $2,5 \pm 1$ mA a $1 \pm 0,1$ mA. Od těchto hodnot tok s proudem lineárně narůstá až po hodnoty prahových proudů (I_P) $36,9 \pm 1$ mA ($\phi \approx 15$ mlm) a $15 \pm 0,1$ mA ($\phi \approx 10$ mlm). Při tomto proudovém zatížení dochází k rapidnímu zvýšení strmosti charakteristiky vlivem převládající stimulované emise záření nad emisí spontánní. Od hodnot prahových proudů po maximální zvolené hodnoty 250 ± 1 mA ($\phi = 54,1 \pm 3,08$ lm) a $150 \pm 0,1$ mA ($\phi = 5,19 \pm 0,3$ lm) mají charakteristiky opět lineární průběh. Vliv zvýšené teploty pouzdra LD $\vartheta = 50 \pm 0,1$ °C (dále jen zvýšená provozní teplota) způsobuje nárůst prahových proudů o 6 ± 1 mA a $3,1 \pm 0,1$ mA a pokles světelného toku při I_{max} v průměru o 6,3 %. **Provoz v CW řízení odpovídá teoretickým předpokladům a údajům uváděných výrobcem.**
- Při **PWM** režimu řízení ($f = 10$ kHz s amplitudou I_{max}) mají charakteristiky světelných toků rozdílný průběh než při CW režimu. Stav spontánní emise, tedy přechod z neemitujícího stavu do laserového režimu, **nastává na velmi krátkém rozsahu** stříd $\approx 0,3$ % PWM. Hodnoty prahů odpovídají střídám 2,3% PWM ($\phi \approx 75$ mlm) a 1,99% PWM ($\phi \approx 4$ mlm), při kterých je světelný tok zhruba o **polovinu nižší oproti CW režimu**. Od hodnot prahů mají charakteristiky po zvolené I_{max} lineární průběh. Zvýšená provozní teplota způsobuje zvýšení prahu pouze o 0,1% PWM a 0,03% PWM. Řízení pomocí PWM tedy **stabilizuje práh z pohledu vlivu zvýšené provozní teploty**.

Spektrometrie - měření dominantní vlnové délky λ_D ze str. 33 (obr. 4.8) a str. 35 (obr. 4.12).

- Při **CW** řízení dochází ve stavu spontánní emise k exponenciálnímu poklesu o $18,9 \pm 1,56$ nm a $9 \pm 1,56$ nm. Po překročení prahového proudu se hodnoty navyšují o $0,5 \pm 1,56$ nm a $1,2 \pm 1,56$ nm. Zvýšená provozní teplota způsobuje v oblasti spontánní emise navýšení zhruba o 2 nm u obou LD. Ve stavu převládající emise stimulované je změna dominantní vlnové délky patrnější u modré LD, kdy dochází k navýšení o $1,2 \pm 1,56$ nm, u zelené LD zvýšená teplota navyšuje λ_D pouze o $0,5 \pm 1,56$ nm. **Výsledky opět odpovídají teoretickým předpokladům a údajům uváděných výrobcem.**
- Při **PWM** řízení jsou hodnoty při počáteční emisi nižší než u CW řízení o $8,3 \pm 1,56$ nm a $3 \pm 1,56$ nm. Při spontánní emisi se po práh s narůstající střídou PWM hodnoty opět snižují a od prahu zvyšují, obdobně jako při CW řízení. Vliv zvýšené teploty způsobuje nárůst o $1,6 \pm 1,56$ nm a $1,8 \pm 1,56$ nm při spontánní emisi. Ve stavu stimulované emise se hodnoty zvyšují podobně jako při CW řízení. Vliv zvýšené teploty nezpůsobuje tak znatelnou změnu jako při CW řízení, lze tedy tvrdit, že **při PWM řízení se LD při zvýšené provozní teplotě chovají stabilněji**.

Spektrometrie - měření šířky spektra v polovině maxima FWHM ze str. 33 (obr. 4.9) a str. 35 (obr. 4.13).

- Při **CW** řízení mají průběhy ve stavu spontánní emise podobný charakter jako u λ_D . Dochází při nich k exponenciálnímu poklesu z $27,9 \pm 1,56 \text{ nm}$ na $\approx 2,8 \pm 1,56 \text{ nm}$ a z $14,9 \pm 1,56 \text{ nm}$ na $\approx 2,5 \pm 1,56 \text{ nm}$. Od hodnot prahových proudů mají průběhy šířky spektra takřka konstantní průběh. Zvýšená provozní teplota má vliv pouze při provozu pod prahem, kdy dochází k rozšíření FWHM o $\approx 1,6 \pm 1,56 \text{ nm}$ a $\approx 2,7 \pm 1,56 \text{ nm}$, kdežto nad prahem není zaznamenána významná změna tohoto parametru.
- Při **PWM** řízení jsou průběhy opět velmi podobného charakteru jako u λ_D , bylo zaznamenáno zúžení FWHM z $23 \pm 1,56 \text{ nm}$ na $\approx 2,8 \pm 1,56 \text{ nm}$ a z $14,9 \pm 1,56 \text{ nm}$ na $\approx 2,5 \pm 1,56 \text{ nm}$. Od hodnot prahů mají průběhy šířky spektra opět konstantní průběh. Z pohledu zvýšené provozní teploty nejsou zaznamenány významné změny tohoto parametru. **FWHM je tedy při zvýšené provozní teplotě stabilnější při PWM režimu řízení než u CW řízení.**

Spektrometrie - měření spektrálních křivek ze str. 36 (obr. 4.14 a 4.15).

- Křivky spekter jsou měřeny při takové střední hodnotě proudu, aby světelný tok odpovídal hodnotám toků v polovině intervalu prahů při CW a PWM režimu. Tyto křivky demonstrují vliv tvaru řídicího proudu na parametry LD v okolí prahu a vyplývá z nich, že **pomocí PWM lze přivést LD do laserového režimu při nižším světelném toku, než u CW režimu řízení.** FWHM je proto širší u CW o $1,6 \pm 1,56 \text{ nm}$ a $1,4 \pm 1,56 \text{ nm}$ oproti PWM. Dominantní vlnová délka se nijak výrazně nemění. Parametry křivek při zvýšené provozní teplotě odpovídají změřeným charakteristikám a předchozímu popisu.

Kapitola 5

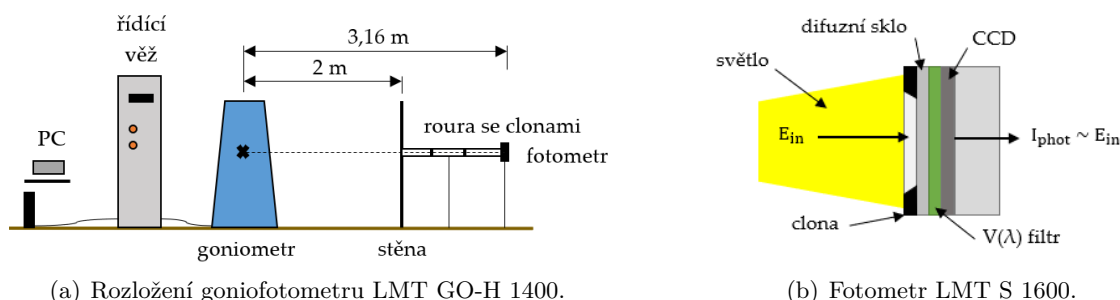
Experiment II. - prostorová svítivost

Další možnou charakterizací LD je určení jejich prostorových parametrů. Pro tento experiment je zvolena charakterizace příčných profilů svazků. V kapitole je nejprve popsán goniofotometr jakožto měřicí zařízení, dále pak konstrukce použitého fotodetektoru s vysvětlením principu detekce. Následuje prezentace naměřených dat a jejich souhrn.

5.1 Použité měřicí zařízení

Příčné profily svazků LD jsou měřeny goniofotometrem LMT GOH-1400. Jedná se o fotometrické laboratorní zařízení pro měření rozložení prostorové svítivosti světelných zdrojů, popř. svítidel v rozsahu $V \pm 90^\circ$ (vertikálně) a $H \pm 90^\circ$ (horizontálně). Zařízením lze také měřit samostatné prostorově definované body, skeny a zóny s vyhodnocením jejich minimální a maximální svítivosti, dále pak řezy a stabilizace. Rozložení tohoto zařízení je zobrazeno na obr. 5.1a. Měřený světelný zdroj je natáčen goniometrem v žádaných úhlech. Světelné paprsky procházejí trubkou se clonami, která odstíní parazitní světlo. Takto odstíněné paprsky jsou detekovány fotometrem S 1600 [46].

Fotometr LMT S 1600 (obr. 5.1b) je přístroj pro měření osvětlenosti rovinného typu. Skládá se z přijímače s fotodiodou a z měřicího a vyhodnocovacího systému. Světlo je nejprve odstíněno clonou, poté je rozptýleno přes difuzní sklo (korekce směrové chyby) a filtrováno $V(\lambda)$ filtrem (přízpůsobení spektrální citlivosti lidskému zraku, popsáno na následující straně) [46].

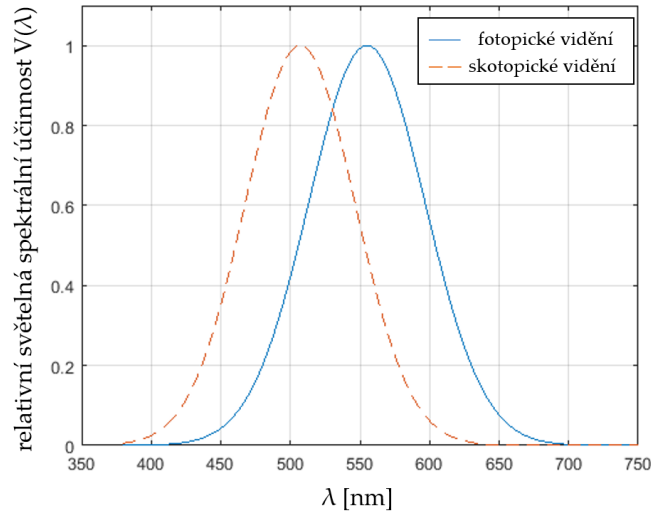


Obrázek 5.1: Měřicí zařízení [46].

Světlo dopadající na fotodiodu je filtrováno $V(\lambda)$ **filtrem**, ten přizpůsobuje spektrum snímaného světla z pohledu citlivosti lidského oka. Lidský zrakový orgán není stejně citlivý na záření různých vlnových délek a liší se u všech jedinců. Spektrální citlivost je také rozdílná při

- **fotopickém** vidění - aktivními fotoreceptory jsou čípky umožňující barevné vidění s maximem při $\lambda = 555$ nm,
- **skotopickém** vidění - aktivními fotoreceptory jsou tyčinky s maximem při $\lambda = 507$ nm.

Kvůli sjednocení přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) dohodu o poměrné spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele. Průběh těchto spektrálních křivek citlivosti zobrazuje obr. 5.2. Modrá křivka patří fotopickému vidění, kdy je vysoký adaptační jas ($100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Červená přerušovaná křivka reprezentuje skotopické vidění, při kterém je naopak adaptační jas velmi nízký ($10^{-5} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Z rozdílnosti těchto křivek plyne závislost spektrální citlivosti zraku na adaptačním jasu [39].

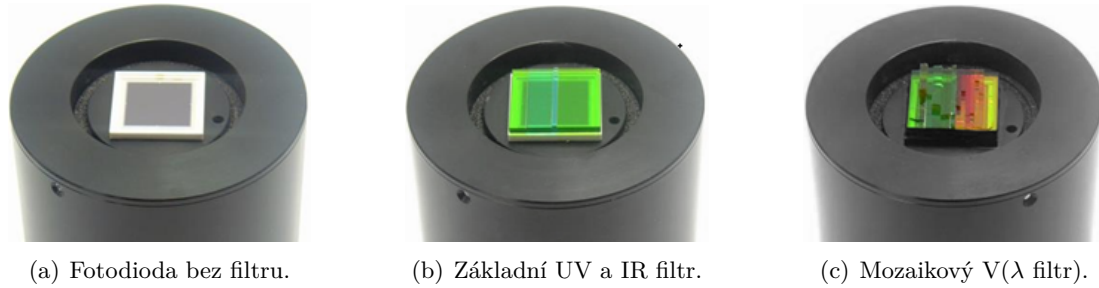


Obrázek 5.2: Křivky $V(\lambda)$ [50].

Fotodioda je plošná dioda reagující na osvětlení. Konstrukční provedení umožňuje osvětlení PN přechodu, u kterého pak s narůstající intenzitou osvětlení roste vodivost v závěrném směru. Děje se tak vlivem vnitřního fotoelektrického jevu. Není-li však přechod osvětlen, fotodioda se chová jako běžná dioda [47]. V případě fotometru S 1600 jsou použity fotodiody HAMAMATSU S2387 series [48]. Výslednou měřenou veličinou je elektrický proud, který díky $V(\lambda)$ filtru přímo odpovídá osvětlenosti dle vztahu (4.3). Spolu s údajem o prostorovém úhlu (Ω) a jemu odpovídajícímu světelnému toku (ϕ) lze určit svítivost dle vztahu (5.1).

$$I_s = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (5.1)$$

Aby bylo dosaženo co nejmenší odchylky od křivky $V(\lambda)$ pro fotopické vidění, jsou filtry u fotometru S1600 sestaveny z mozaiky velmi malých skleněných částic (více než 200 různých druhů). Obr. 5.3 zobrazuje hlavu fotometru s jednotlivými vrstvami filtrů [51]. Takto zhotovené filtry dosahují průměrné chyby $\pm 0,8 \%$.



Obrázek 5.3: Fotometr LMT S 1600 [51].

Tab. 5.1 uvádí limitní třídy definované dle DIN 5032-7:2017-02, u_{cal} je nejistota měření kalibrace fotometru (nejistota přenosu včetně nejistoty použitého referenčního standardu), uvedená s úrovní spolehlivosti přibližně 95 % (odpovídá $k = 2$). Fotometr je dle DIN EN 13032-1 charakterizován třídou L – laboratorní použití pro kolmý dopad světla [52].

vliv	symbol	hodnota [%]
kalibrace	u_{cal}	0,9
$V(\lambda)$ filtr	f_1	0,8
UV filtr	u	0,2
IR filtr	r	0,2
redukce úhlu (cos)	f_2	0,3
linearita	f_3	0,1
materiálová únava	f_5	0,1
teplotní závislost	f_6	0,1
rozsah	f_{11}	0,1

Tabulka 5.1: Limity měřiče osvětlení ve třídě L [52].

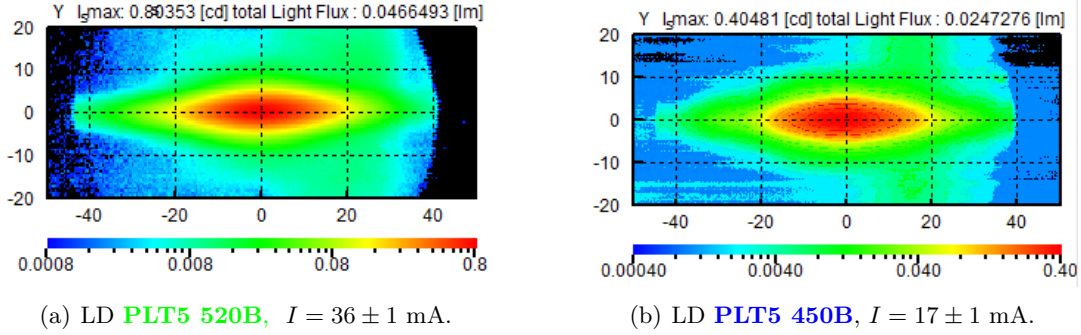
Celková nejistota měřidla je součet výše uvedených limitů, tedy

$$f_{\text{total}} = u_{\text{cal}} + f_1 + u + r + f_2 + f_3 + f_5 + f_6 + f_{11} = 2,8 \%. \quad (5.2)$$

Nejistota natočení goniometru je dle kalibračního listu $0,01^\circ$. Příčné profily svazků nebyly opakovaně měřeny.

5.2 Měření prostorové svítivosti

Vliv tvaru řídicího proudu na prostorovou svítivost je zkoumán pouze u příčných profilů s dostatečnou světelnou intenzitou, tj. $I \geq \frac{I_{max}}{2}$. Ukázky těchto nízko intenzivních profilů v CW režimu řízení zobrazuje obr. 5.4. Profily odpovídají hodnotám pro **PLT5 520B** při $I = 36 \pm 1$ mA a pro **PLT5 450B** při $I = 17 \pm 1$ mA.

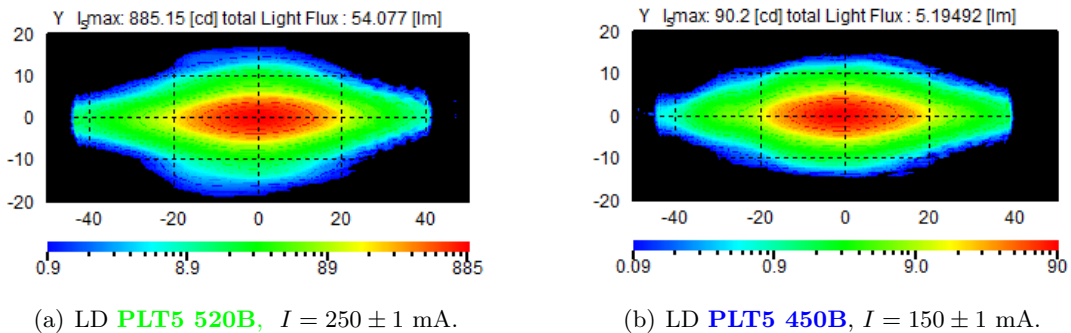


Obrázek 5.4: Příčné profily v blízkosti prahu.

Porovnání je provedeno následujícím postupem.

- Náměr profilu při maximálním zvoleném proudu (I_{max}) s normalizací $\phi = 1$ lm,
- náměr profilů v CW režimu při $\frac{1}{2} I_{max}$ a $\frac{3}{4} I_{max}$, normalizace $\phi = 1$ lm a následný odečet od normalizovaného profilu při I_{max} ,
- náměr profilů v PWM režimu při 50 % a 75 % PWM I_{max} , normalizace $\phi = 1$ lm a následný odečet od normalizovaného profilu při I_{max} ,
- náměr profilu při I_{max} s regulací teploty pouzdra $\vartheta = 50$ °C a odečet normalizovaného při I_{max} .

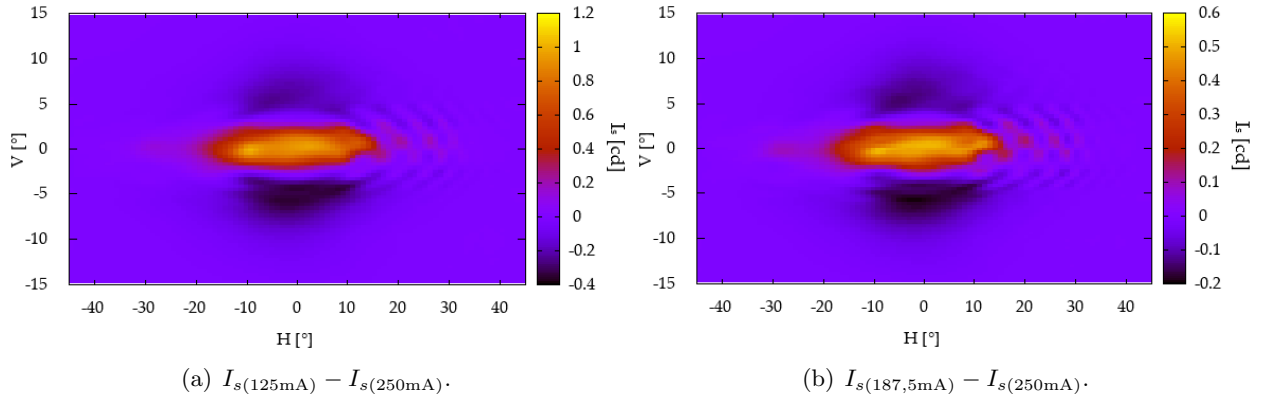
Porovnání je shrnuto na str. 51. Příčné profily svazků při I_{max} zobrazuje obr. 5.5. Profily odpovídají hodnotám pro **PLT5 520B** při $I = 250 \pm 1$ mA a pro **PLT5 450B** při $I = 150 \pm 1$ mA.



Obrázek 5.5: Příčné profily při I_{max} .

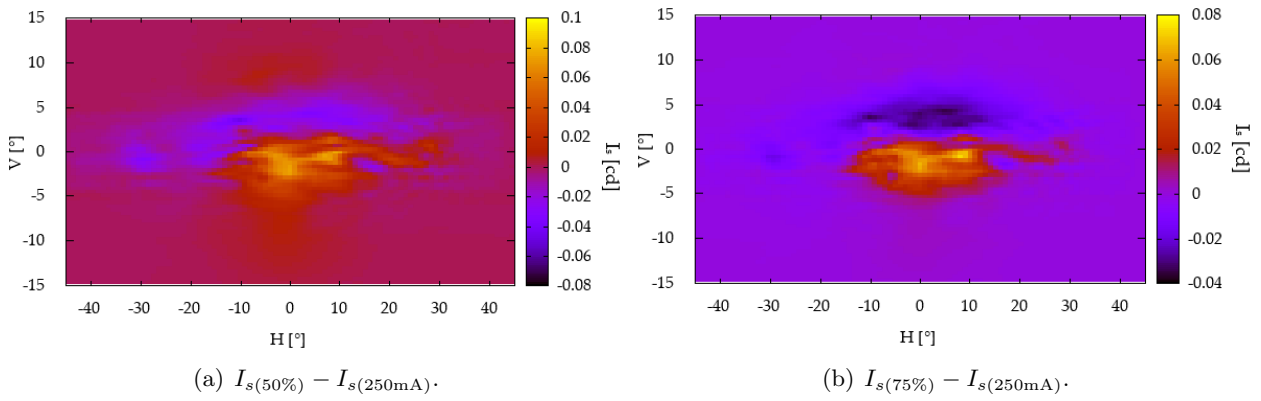
Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 520B** po normalizaci $\phi = 1$ lm,

- CW režim,



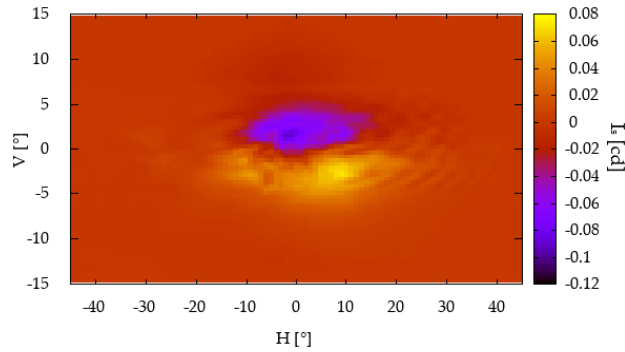
Obrázek 5.6: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 520B** - CW režim.

- PWM režim,



Obrázek 5.7: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 520B** - PWM režim.

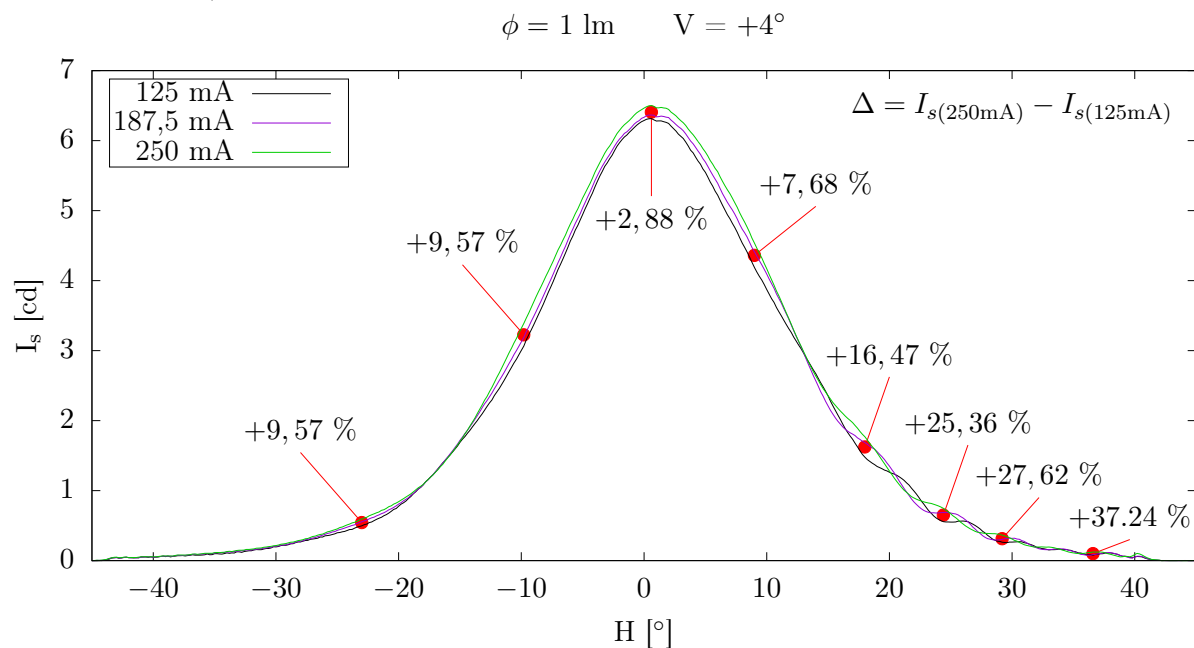
- vliv teploty **zvýšené teploty** pouzdra $\vartheta = 50$ °C.



Obrázek 5.8: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 520B**, $I_{s(250\text{mA}_{\vartheta=50\text{ °C}})} - I_{s(250\text{mA})}$.

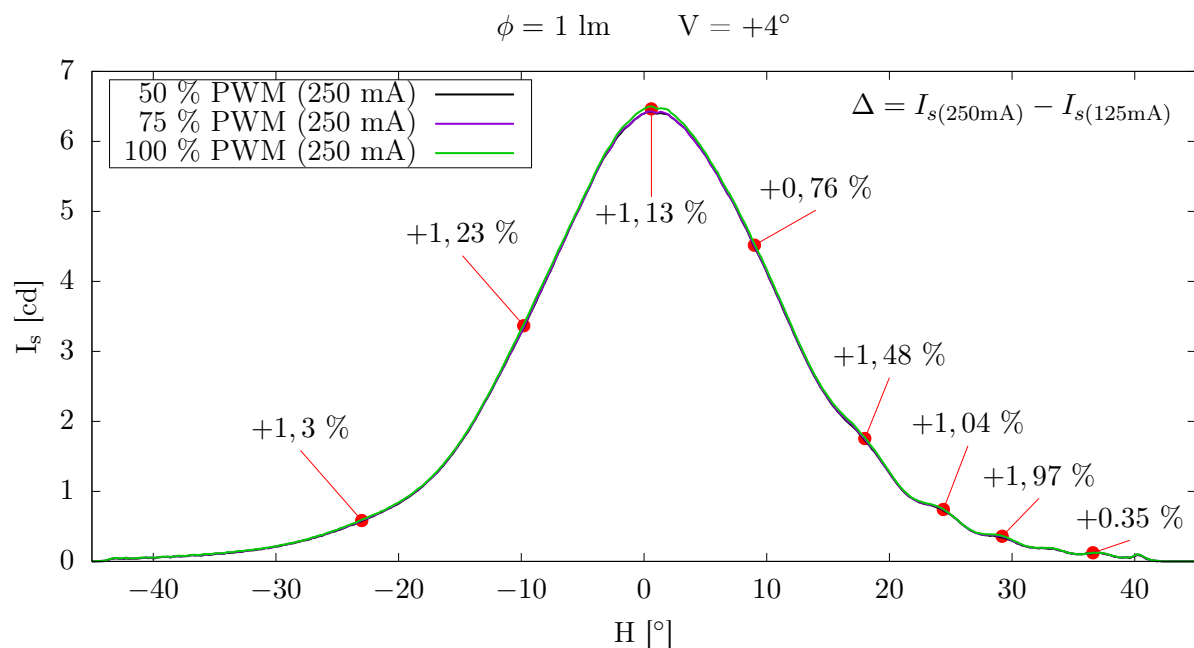
Horizontální průběhy svítivostí příčných profilů ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 520B** s vyznačením významných rozdílů hodnot,

- **CW** režim,



Obrázek 5.9: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 520B** - CW režim.

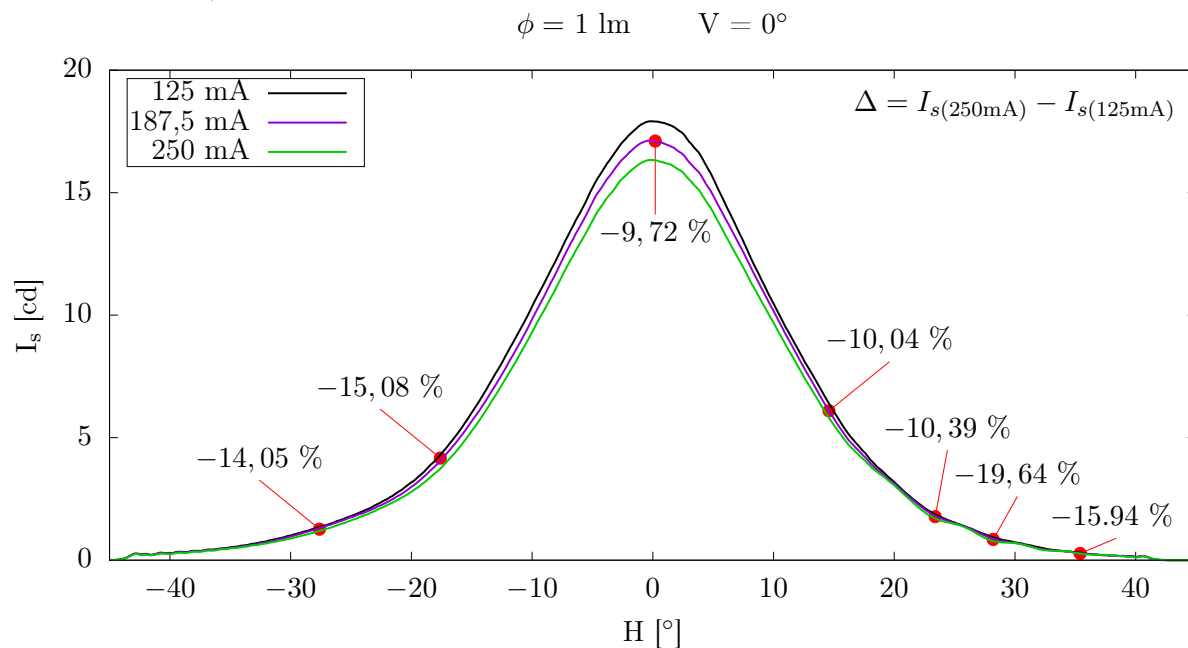
- **PWM** režim.



Obrázek 5.10: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 520B** - PWM režim.

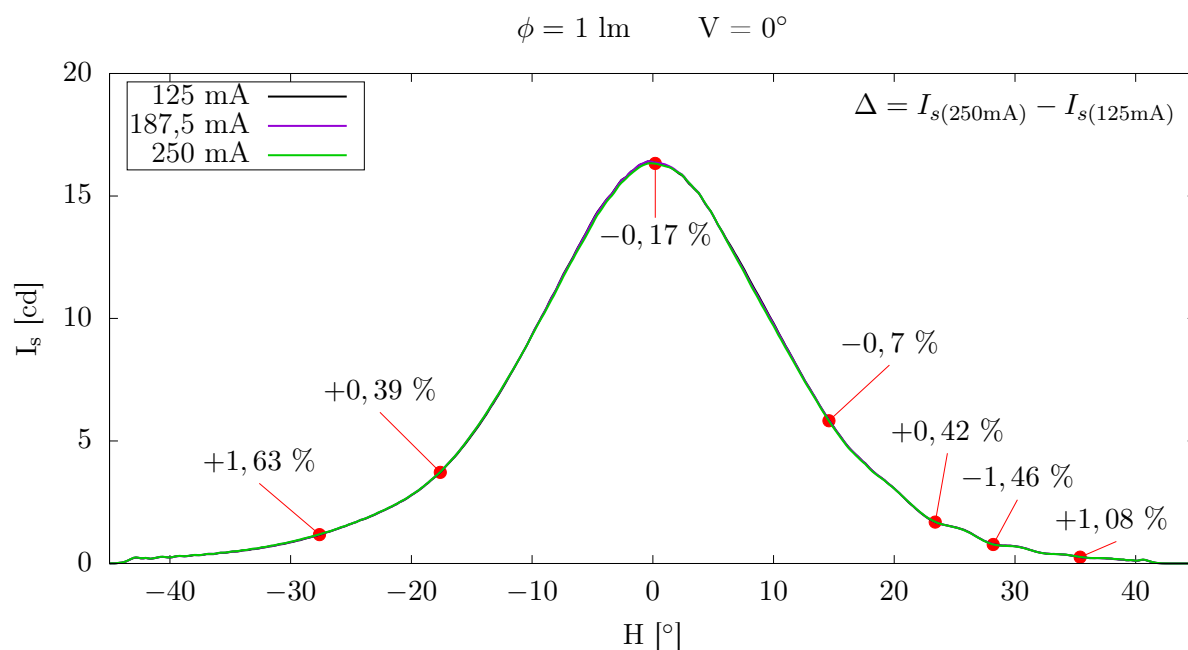
Horizontální průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 520B**,

- **CW** režim,



Obrázek 5.11: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 520B** - **CW** režim.

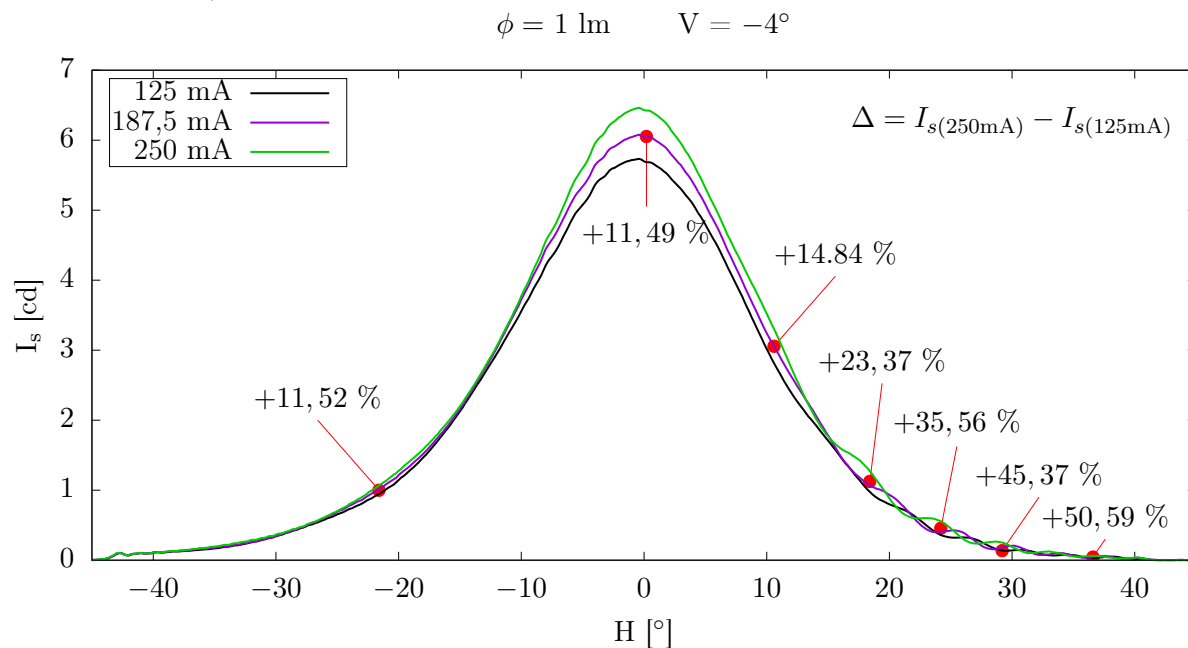
- **PWM** režim.



Obrázek 5.12: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 520B** - **PWM** režim.

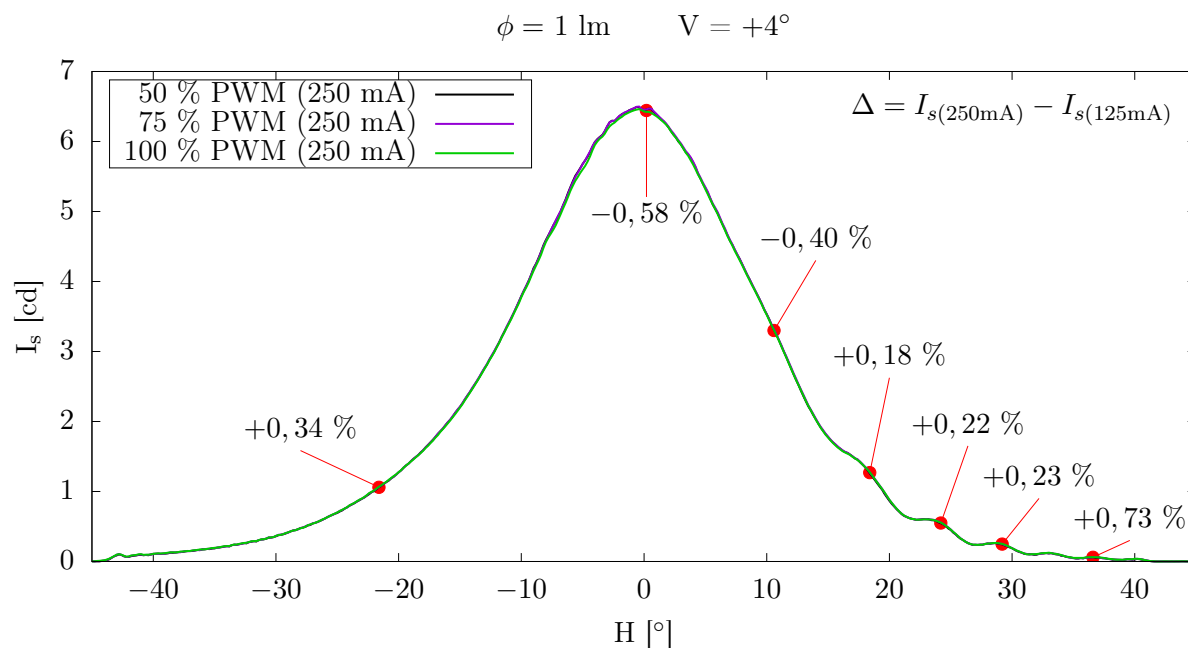
Horizontální průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 520B**,

- **CW** režim,



Obrázek 5.13: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 520B** - **CW** režim.

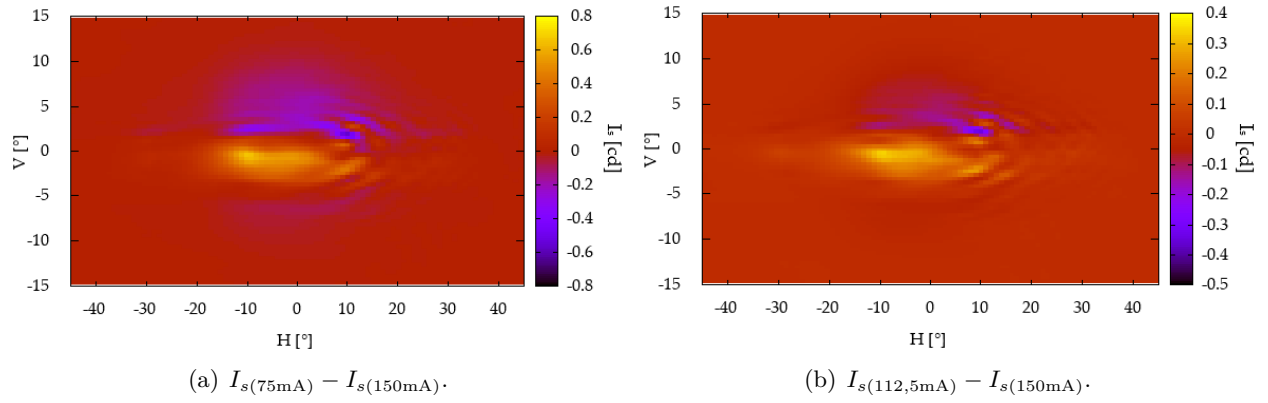
- **PWM** režim.



Obrázek 5.14: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 520B** - **PWM** režim.

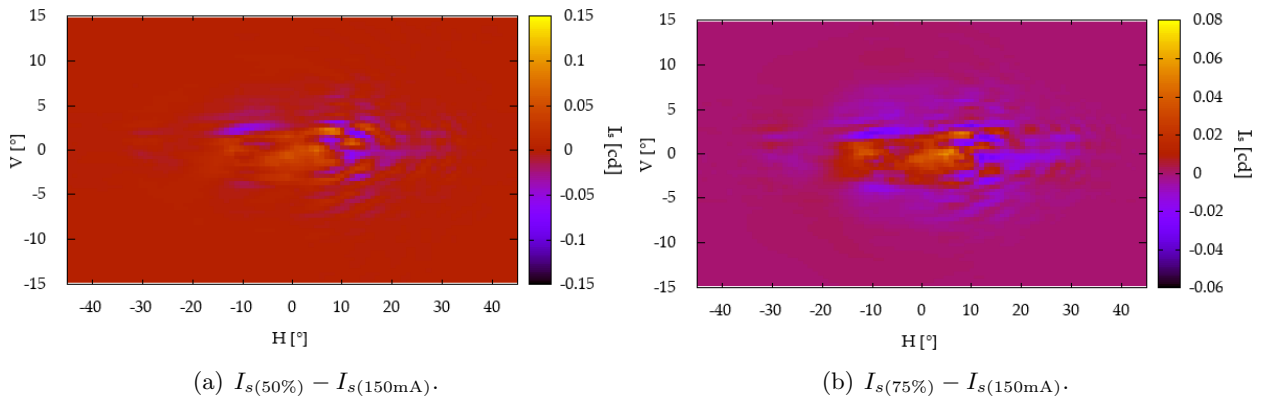
Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 450B** po normalizaci $\phi = 1$ lm,

- CW režim,



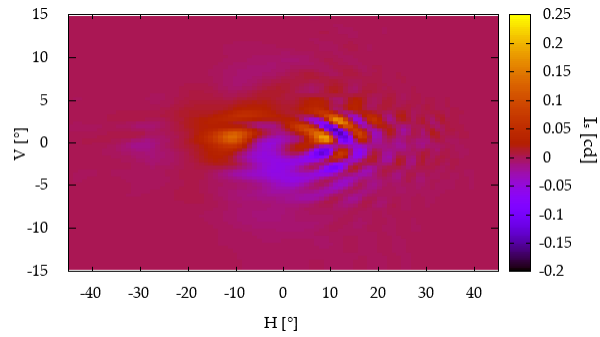
Obrázek 5.15: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 450B** - CW režim.

- PWM režim,



Obrázek 5.16: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 450B** - PWM režim.

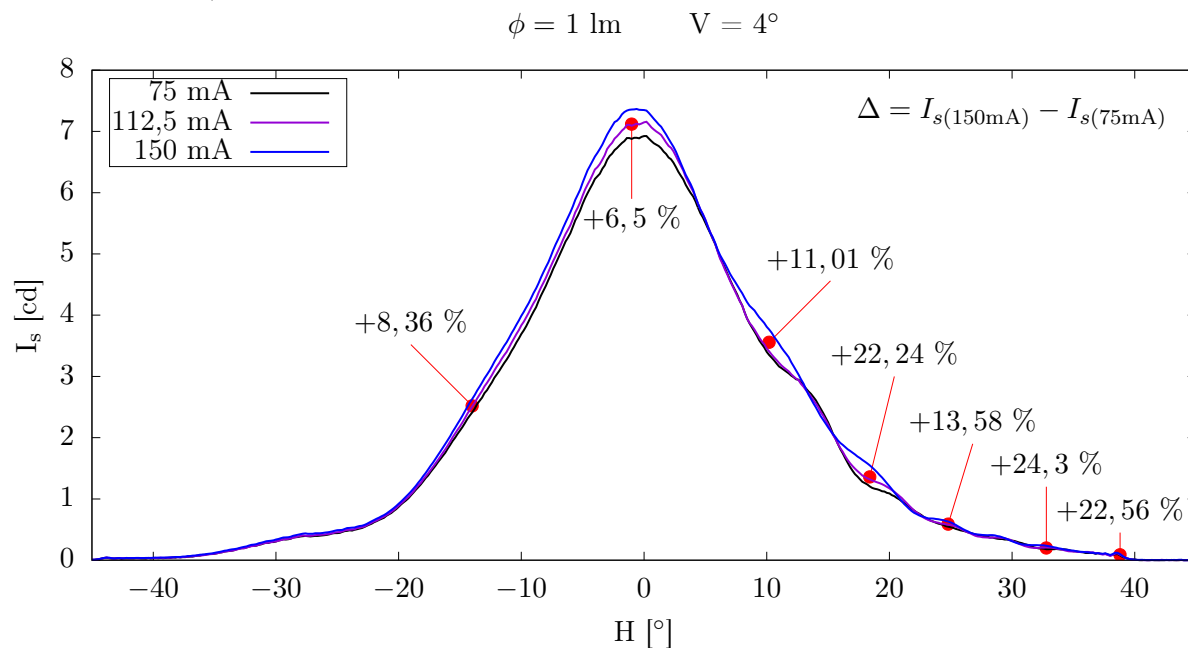
- vliv teploty **zvýšené teploty** pouzdra $\vartheta = 50$ °C.



Obrázek 5.17: Rozdíly příčných profilů LD **PLT5 450B**, $I_{s(150\text{mA}_{\vartheta=50 \text{ °C}})} - I_{s(150\text{mA})}$.

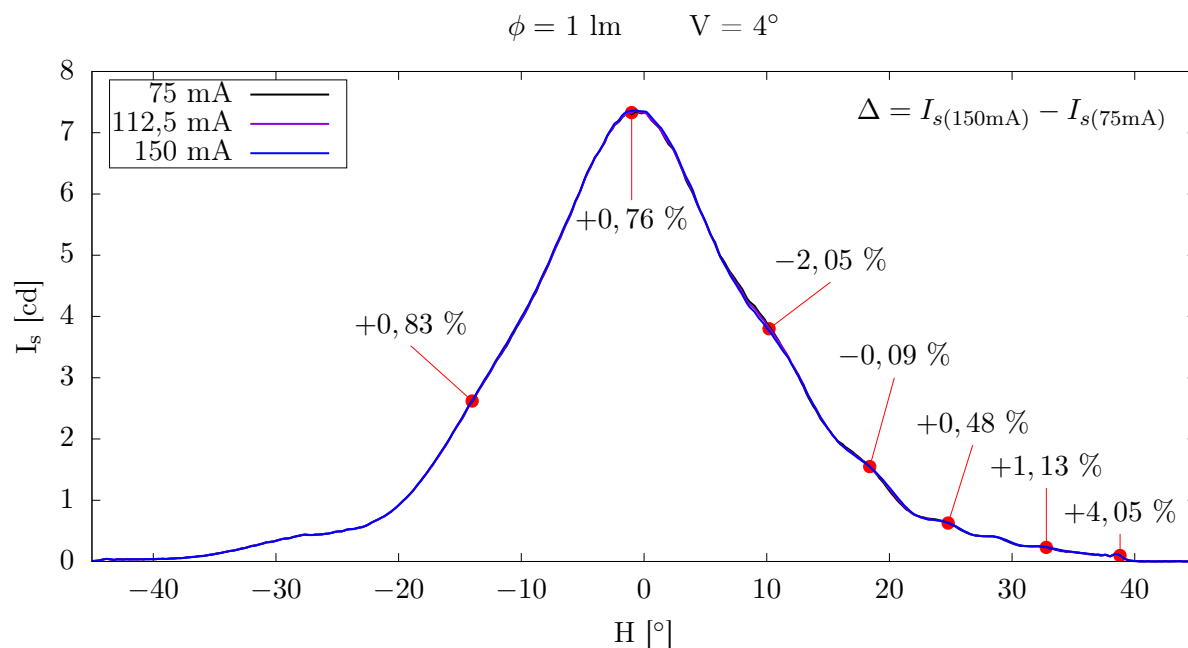
Horizontální průběhy svítivosti příčných profilů ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 450B**,

- **CW** režim,



Obrázek 5.18: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 450B** - **CW** režim.

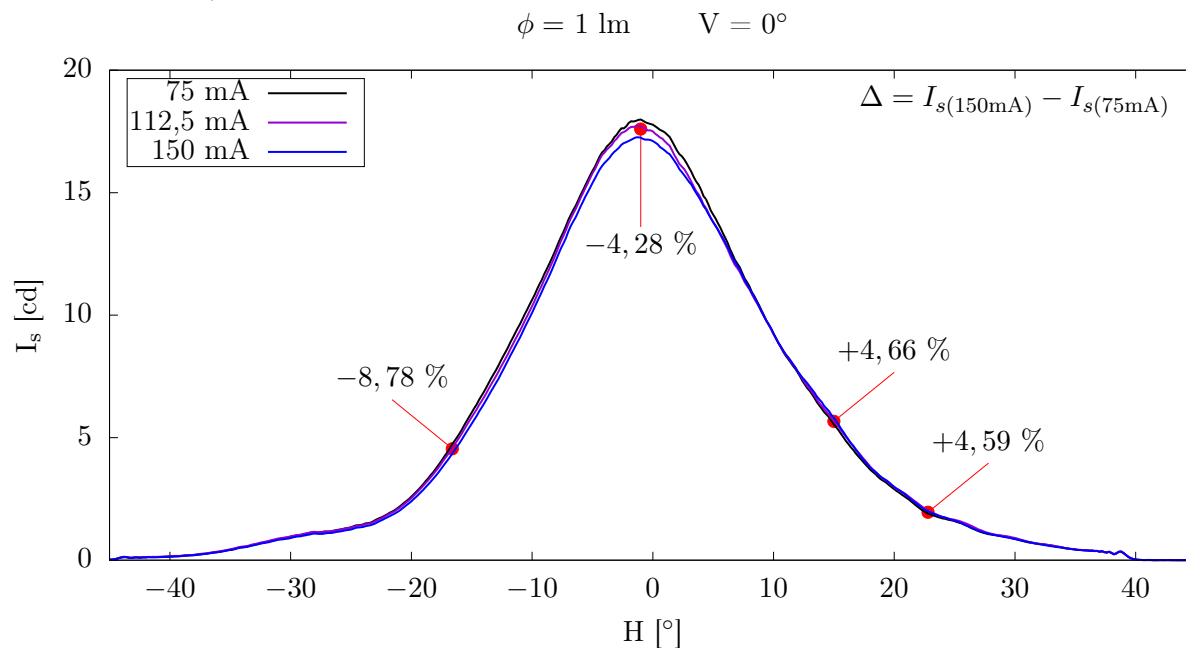
- **PWM** režim.



Obrázek 5.19: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 4° LD **PLT5 450B** - **PWM** režim.

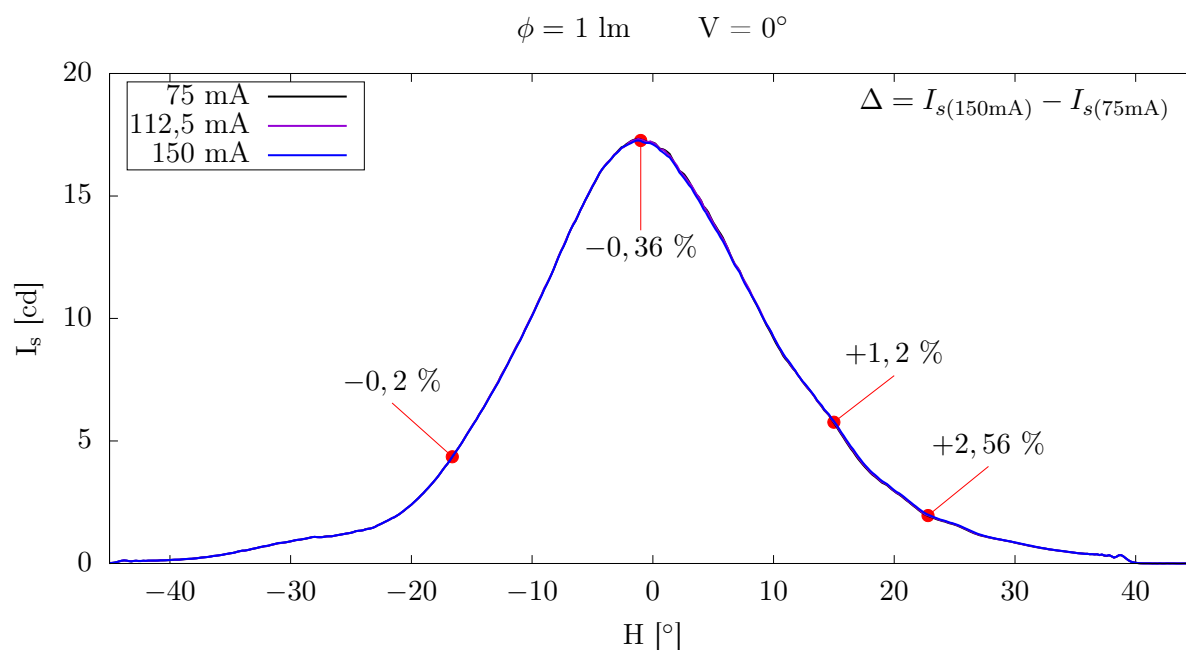
Horizontální průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 450B**,

- **CW** režim,



Obrázek 5.20: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 450B** - **CW** režim.

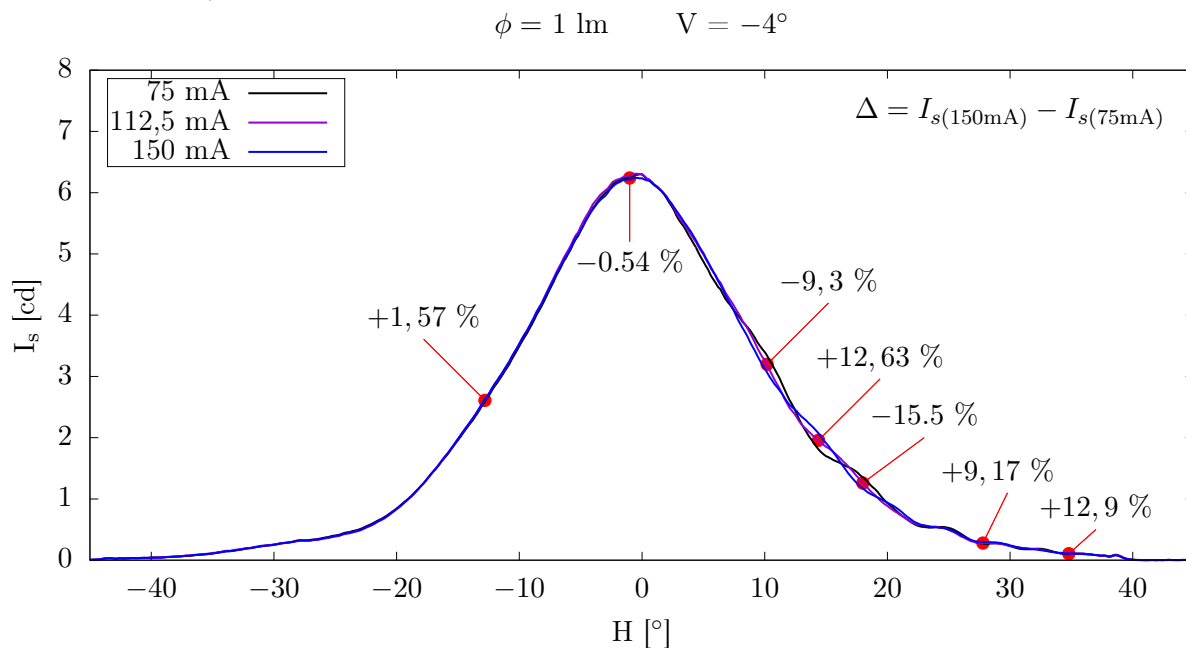
- **PWM** režim.



Obrázek 5.21: Průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu 0° LD **PLT5 450B** - **PWM** režim.

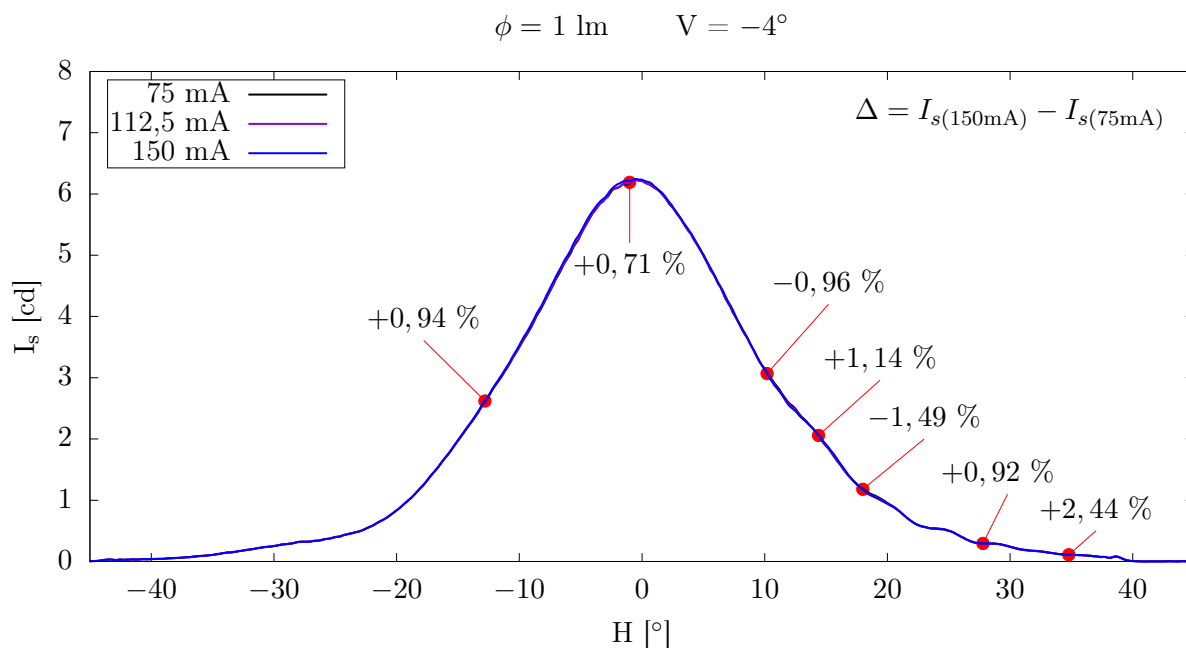
Horizontální průběhy svítivostí příčných profilů ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 450B**,

- **CW** režim,



Obrázek 5.22: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 450B** - **CW** režim.

- **PWM** režim.

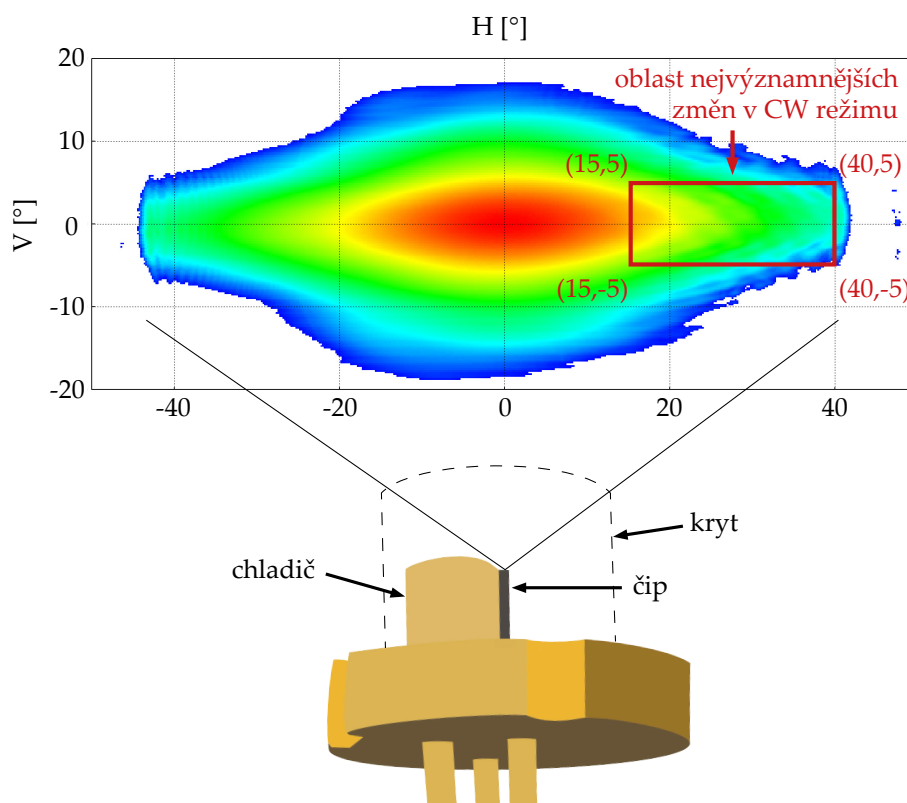


Obrázek 5.23: Průběhy svítivostí ve vertikálním úhlu -4° LD **PLT5 450B** - **PWM** režim.

5.3 Souhrn měření prostorové svítivosti.

Měření prostorových svítivostí.

- Při **CW** režimu řízení dochází se zvyšující se okamžitou hodnotou proudu v oblasti $H \pm 15^\circ$ k přesunu svítivosti směrem k horizontální ose (viz obr. 5.6 a 5.15). V levé části světelné projekce od této oblasti nejsou zaznamenány významné změny. Naopak oblast vpravo (od $H + 15^\circ$, $V \pm 5^\circ$ do $H + 45^\circ$, $V \pm 5^\circ$) vykazuje nejvýznamnější změny svítivosti nepravidelného charakteru (znázorňuje ilustrace 5.24). Tato zjištění potvrzují i horizontální průběhy svítivosti ve vertikálním úhlu $V + 4^\circ$ (obr. 5.9 a 5.18), kdy jsou při rozdílech $\Delta = I_{s(I_{max})} - I_{s(\frac{I_{max}}{2})}$ zobrazené hodnoty převážně kladné, kdežto u průběhů vertikálním úhlu $V 0^\circ$ (obr. 5.11 a 5.20) naopak převážně záporné a při vertikálním úhlu $V - 4^\circ$ (obr. 5.13 a 5.22) opět kladné. U těchto průběhů jsou v oblasti (vyznačené na obr. 5.24) zaznamenány nejvýznamnější změny svítivosti u zelené LD ve $V - 4^\circ$ zhruba **50%** a u modré ve $V + 4^\circ$ zhruba **25%**. Provoz v **CW** režimu **má vliv** na prostorové rozložení svítivosti, a proto lze tvrdit, že prostorová svítivost je z neznámé příčiny **závislá na okamžité hodnotě proudu**.



Obrázek 5.24: Ilustrace oblasti nejvýznamnějších změn při **CW** režimu řízení.

- Při **PWM** režimu řízení se naopak se změnou střední hodnoty proudu (pomocí střídý PWM) významně nemění prostorové rozložení svítivosti (viz obr. 5.7 a 5.16). Tento jev potvrzují i průběhy horizontálních svítivostí (pro **LD PLT5 520B** obr. 5.10, 5.12 a 5.14 a pro **LD PLT5 450B** obr. 5.19, 5.21 a 5.23), při kterých jsou rozdíly $\Delta = I_{s(I_{max})} - I_{s(\frac{I_{max}}{2})}$ maximálně v řádu jednotek procent. Provoz v **PWM** režimu **nemá vliv** na prostorové rozložení svítivosti, respektive **změna střední hodnoty proudu pomocí PWM** nemění tvar světelné projekce.
- U obou LD **není prokázán významný vliv zvýšené provozní teploty** ($\vartheta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) na prostorovnou svítivost (viz obr. 5.8 a obr. 5.17).

Kapitola 6

Závěr

Práce se zabývá vlivem průběhu řídicího proudu světelných laserových diod (LD) na jejich optické parametry. Porovnáván je vliv kontinuálního proudového řízení (CW) a řízení pomocí pulzní šířkové modulace proudu (PWM) s ohledem na fotometrické, spektrální a prostorové parametry. Kromě vlivu tvaru řídicího proudu je také porovnáván vliv zvýšené teploty pouzdra (50 °C). Tyto vlivy jsou zjišťovány u vybraných LD OSRAM **PLT5 520B** a **PLT5 450B**, jejichž číselné i barevné označení odpovídá spektrální oblasti emitovaného záření. Jedná se o lasery třídy 3B s maximálním optickým výkonem 80 mW, používané např. v lékařských aplikacích nebo projekční technice.

Po úvodní kapitole seznamující s problematikou laserů a laserových diod jsou popsány vytipované LD a způsob jejich řízení. Následují dvě kapitoly zabývající se experimenty, ve kterých jsou nejprve uvedeny definice měřených veličin a následně vysvětleny principy jejich detekce. Určena je také nejistota použitých měřidel. Výsledky měření jsou prezentovány ve formě grafů s vyznačenými hodnotami, které jsou následně diskutovány v kontextu porovnání obou použitých metod řízení a vlivu zvýšené provozní teploty na sledované parametry.

Měření fotometrických a spektrálních parametrů při **CW** režimu řízení odpovídá teoretickým předpokladům a zároveň koresponduje s uvedenými parametry danými výrobcem. Od počátku detekovatelné emise záření světelný tok (ϕ) lineárně narůstá s proudem a spektrum se podobá světelné diodě LED, jedná se o stav spontánní emise záření. Po překročení hodnot prahových proudů dochází vlivem převládající stimulované emise záření k nárůstu strmosti závislosti toku na proudu a ke zúžení spektrálních křivek. Těmto charakteristikám odpovídají i měření dominantní vlnové délky (λ_D), která ovšem oproti šířce spektra v polovině maximální hodnoty (FWHM) mírně narůstá i nad prahem.

Při **PWM** režimu řízení mají charakteristiky rozdílný průběh než při CW režimu. Stav spontánní emise nastává pouze na velmi krátkém rozsahu stříd ($\approx 0,3$ % PWM), přičemž je světelný tok při prahu zhruba o polovinu nižší než u CW režimu. Tomuto zjištění odpovídají průběhy charakteristik λ_D i FWHM. Zvýšená provozní teplota způsobila minimální změnu prahu v řádu desetin či setin procent PWM. Řízení pomocí PWM tedy stabilizuje práh z pohledu vlivu zvýšené provozní teploty.

Z výsledků měření prostorové svítivosti vyplývá, že při **CW** řízení dochází vlivem změny okamžité hodnoty proudu ke změnám tvaru světelné projekce. V oblasti $H \pm 15^\circ$ se se zvyšujícím se proudem přesouvá svítivost směrem k horizontální ose, v levé části projekce od této oblasti nejsou zaznamenány významné změny. Naopak oblast vpravo (od $H + 15^\circ$ $V \pm 5^\circ$ do $H + 45^\circ$ $V \pm 5^\circ$) vykazuje nejvýznamnější změny prostorového rozložení svítivosti nepravidelného charakteru v řádů až desítek procent. Vliv zvýšené teploty nezpůsobuje významnější změny. Naopak při **PWM** řízení nedochází k tak dramatickým změnám tvaru projekce, zaznamenané změny byly maximálně v jednotkách procent. Prostorová svítivost je tedy závislá na okamžité hodnotě proudu, příčiny tohoto jevu nebyly objasněny.

Jako možné rozšíření této diplomové práce navrhuji provést stejná měření pro různé frekvence pravoúhlé PWM, i pro jiné tvary řídicích proudů jako je např. pilový nebo lichoběžníkový průběh. Dále provést měření pomocí Michelsonova interferometru pro zjištění průběhů koherenčních délek a povahy světelných interferencí. V poslední řadě je možné také u LD s odstraněným krytem provést měření povrchu polovodičového čipu pomocí interference v bílém světle, nebo elektronové mikroskopie. Měření povrchu může objasnit, jestli je vliv okamžité hodnoty proudu na prostorové rozložení svítivosti způsoben geometrickou změnou čipu, tzn. piezoelektrickým jevem.

Literatura

- [1] PLANCK, M. *Entropy and Temperature of Radiant Heat*. Annalen der Physik, vol. 1. no 4. str. 719-37. 1900
- [2] EINSTEIN, A. *The Quantum Theory of Radiation* Physikalische Zeitschrift 18, 121. 1917
- [3] SCHAWLOW, A. L. TOWNES, C. H. *Infrared and Optical Masers*. Phys. Rev. 112, 1940 – 1958
- [4] *All Nobel Prizes*. [online]. <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes/>. [cit. 2020-09-17]
- [5] MAIMAN, T. *Stimulated Optical Radiation in Ruby*. Nature. 187 (4736): 493–94. 1960
- [6] MARSHALL, J. TROKEL, S. KRUEGER. R, *Photoablative reprofiling of the cornea using an excimer laser: Photorefractive keratectomy*. Lasers in Ophthalmology 1986; 1: 21–48.
- [7] PÁTEK, K. *Kvantový generátor s neodymovým sklem*. Slaboproudý obzor 25. 390. 1964.
- [8] SNITZER, E. *Optical maser action of Nd+3 in a barium crown glass*. Phys. Rev. Lett. 7, 444. 1961.
- [9] JUNGWIRTH, K. ROHLENA, K. ULLSCHMIED, J. *Výkonové systémy*. Československý časopis pro fyziku. vyd. 53. 2003.
- [10] LOSEV, O. V. *Luminous caborundum detector and crystal oscilator*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 6:39, 1024-1044. 1928
- [11] LEHOVEC, K. ACCARDO, C. A. JAMGACHIAN, E *Injected Light Emission of Silicon Carbide Crystals*. Phys. Rev. 83, 603 – Published 1 August 1951
- [12] HALL, R. N. FENNER, G. E. KINGSLEY, J. D. SOLTYS, T. J. CARLSON, R. O. *Coherent Light Emission From GaAs Junctions*. Phys. Rev. Lett. 9, 366. Published 1. November 1962
- [13] HOLONYAK, Jr. N. BAVACQUA, S. F. *Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions*. Appl. Phys. Lett., vol. 1, pp. 82-83, 1962.

- [14] HULICIUS, E. *Vybrané polovodičové nanotechnologie a nanostruktury*. V Praze: České vysoké učení technické, 2005. 30 s. Habilitační přednášky, 12/2005. ISBN 80-01-03235-3.
- [15] VRBOVÁ, M. a kol. *Lasery a moderní optika*. Vyd. 1, 2012. EAN: 9788085849569
- [16] ALFEROV, Z. *Double Heterostructure Lasers: Early Days and Future Perspectives*. IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2000
- [17] PANISH, M. B. HAYASHI, I. SUMSKI S. *DOUBLE-HETEROSTRUCTURE INJECTION LASERS WITH ROOM-TEMPERATURE THRESHOLDS AS LOW AS 2300 A/cm²*. Appl. Phys. Lett. 16, 326. 1970
- [18] KUSALA, J. *Lasery kolem nás - aplikace laserů* [online] Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm> [cit. 2020-08-18]
- [19] BOROSON, D.M. BISWA, ABHIJIT, EDWARDS, BRENNAN. *MLCD: Overview of NASA's Mars laser communications demonstration system. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2004. 10.1117/12.543014.
- [20] *HELLA INTRODUCES CAR FEATURING DYNAMIC HD MATRIX LED HEADLAMPS WITH LASER HIGH BEAMS* [online] Dostupné z: <https://www.hella.com/hella-com/en/press/Technology-Products-14-05-2018-16945.html> [cit. 2020-08-18]
- [21] WEBER, M.J. *Handbook of laser wavelengths*. CRC Press. 1999 ISBN 978-0-8493-3508-2.
- [22] SEDLÁČEK, K. *Laser v mnoha podobách* Vyd. 1 Praha: Naše vojsko, 1982. 256 s.
- [23] LAPSANSKÁ, H. *Laserové technologie v praxi* [online] Dostupné z: <http://www.fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf> [cit. 2019-07-12]
- [24] KACHTÍK, L. *Typy laserů* [online] Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/typy.html> [cit. 2019-07-16]
- [25] KOŘÁN, P. *Základní princip laseru a jejich dělení* [online] Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-127> [cit. 2019-08-16]
- [26] HADERKA, O. *Rezonátorová optika* [online] Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/haderka/bem3/BEM3_rez.pdf
- [27] BAJER, J. *Optika 2*. Vyd. 1 Olomouc: chup.net, 2018. 512 s. ISBN 978-80-907098-0-5

- [28] BERISHEV, I. KOMISSAROV, A. MOSHEGOV, M. AlGaInAs/GaAs record high-power conversion efficiency and record high- brightness coolerless 915-nm multimode pumps. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2005. DOI: 10.1117/12.585337
- [29] *Laser* [online] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser> [cit. 2019-07-21]
- [30] MIŠEK, J. KUČERA L. KORTÁN, J. *Polovodičové zdroje optického záření*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. Polovodičová technika, sv. 38.
- [31] *Using visible InGaN laser diodes from OSRAM Opto Semiconductors* [online] Dostupné z: https://www.osram.us/os/applications/application-notes/application_notes_lasers.jsp [cit. 2021-02-22]
- [32] KARMAN, M. *Determination of Principal Parameter* [online] Dostupné z: <https://www.laserdiodecontrol.com/laser-diode-parameter-overview> [cit. 2020-09-23]
- [33] LUKÁŠ, M. *LASEROVE DIODY* [online] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html> [cit. 2020-09-24]
- [34] LIANG, D. WANG, J. HUANG, J. YEH, J. MAWST, L. HALL, D. *Deep-Etched Native-Oxide-Confined HighIndex-Contrast AlGaAs Heterostructure Lasers With 1.3 μm Dilute-Nitride Quantum Wells*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 13(5):1324 - 1331. October 2007
- [35] KOLLMANN, D. HOGAN, W. STEIDL, CH. HIBBS-BRENNER, M. HEDIN, D. LICHTER, P. *VCSEL based, wearable, continuously monitoring pulse oximeter*. 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, 2013, pp. 4156-4159. 2013
- [36] *Laser Diode Characteristics and Definitions* Global Laser Ltd. Rev. 2, Abertillery. United Kingdom 9090-04-072
- [37] *Visible Laser Diodes* katalog Osram Opto semiconductors Inc [online] https://media.osram.info/media/img/osram-dam-2226995//Visible_lasers_Flyer.pdf [cit. 2020-09-30]
- [38] *Thorlabs.com - Temperature Controlled Mount for Ø5.6 mm or Ø9 mm Laser Diodes*. [online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/obsolete/2017/TCLDM9.pdf> [cit. 2020-08-7]
- [39] *CIE 127:2007 Measurement of LEDs*. Central Bureau of the CIE. Vídeň. Rakousko. 2007. ISBN 978-3-901906-58-9
- [40] HALLIDAY, David. WALKER, Jearl. RESNICK, Robert. *Fyzika*. Vyd. 6 Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001 1279 s. ISBN 81-214-1869-9

- [41] PELANT, T. FIALA, J. POSPÍŠIL, J. FAHNRICH, J. *Fyzikálnípraktikum III - Optika*, Karolínium, Praha 1993
- [42] DRÁPELA, P. *Studium pórovitosti svaru hliníkové slitiny řady 5000 při hybridním svařování Laser-TIG* [online]. Brno, 2017. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149543. Bakalářská práce. VUT v Brně. [cit. 2020-08-7]
- [43] *Integrating Spheres*. Datasheet Avantes. [online]. Dostupné z <file:///C:/Users/sloumi1/Downloads/DS-Acc-Integrating-Spheres-200702.pdf> [cit. 2020-10-30]
- [44] *CAvaSpec-HS2048XL-EVO SensLine High UV and NIR Sensitivity Back-thinned CCD Spectrometer*. Datasheet AVANTES. [online]. Dostupné z <https://www.avantes.com/products/spectrometers/sensline/avaspec-hs2048xl-evo/> [cit. 2021-2-23]
- [45] *Introduction to Spectrometers*. [online]. Dostupné z <https://www.avantes.com/support/theoretical-background/introduction-to-spectrometers/> [cit. 2021-2-23]
- [46] ROCHOL, J. *Photometric equipment engineering for signal- headlamps at Hella*. Internal dokument HELLA AUTOTECHNIK NOVA. 2012
- [47] DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky 3, optoelektronické prvky a optická vlákna*, BEN - technická literatura, Praha, 2005, ISBN: 80-7300-184-5
- [48] *SI photodiodes S2387 series* Datasheet HAMAMATSU. [online]. Dostupné z https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2387_series_kspd1033e.pdf [cit. 2021-1-31]
- [49] *interference světla* [online] Dostupné z: https://kalabovi.org/pitel:msz:interference_svetla [cit. 2020-20-20]
- [50] BÉCHADERGUE, B. *Visible Light Range-Finding and Communication Using the Automotive LED Lighting*. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay. 2017.
- [51] *MOSAIC FILTERING*. [online] Dostupné z: <https://www.lmt.de/mosaic-filtering/> [cit. 2020-10-29]
- [52] ČSN EN 13032-1 (360456). *Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 1: Měření a formát souboru údajů*. Evropský výbor pro normalizaci, 2005. Třídící znak 360456.

Přílohy

Příloha č. 1 - Datasheet OSRAM PLT5 520B

Příloha č. 2 - Datasheet OSRAM PLT5 450B